

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

KONSTRUKCE HHO GENERÁTORU

DESIGN OF HHO GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL GAŠPEREC

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JIŘÍ KREJSA, PH.D.

BRNO 2012

Anotácia

Táto diplomová práca sa zaoberá konštrukciou vodíkového generátora určeného pre automobilový priemysel.

Cieľom práce je navrhnúť systém schopný produkovať požadované množstvo plynu.

Práca zahŕňa predbežnú analýzu situácie, popis procesu elektrolýzy matematickými rovnicami a postup rozmerového návrhu elektrolyzéra podľa požadovaného výkonu. Práca taktiež obsahuje návrh spôsobu riadenia výkonu elektrolyzéra na základe informácií získaných z automobilu. Záver práce hovorí o spôsobe napájania celého systému elektrickou energiou.

Výsledkom práce je celkový návrh vodíkového generátora so senzorickým a riadiacim systémom. Práca taktiež obsahuje návrhy na ďalšie zlepšenia a výskum.

PodĎakovanie

Rád by som týmto poďakoval vedúcemu diplomovej práce Ing. Jiřímu Krejsovi Ph.D. za cenné rady, vedenie a predovšetkým trpezlivosť. Poďakovanie patrí i mojim blízkym, rodine a všetkým, ktorí ma počas celého štúdia podporovali.

Prehlásenie

Týmto prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému „Konstrukce HHO generátoru“ vypracoval samostatne bez cudzej pomoci a na základe rád a pokynov vedúceho diplomovej práce. Vychádzal som zo svojich znalostí, konzultácií a odbornej literatúry. Súhlasím so zapožičiavaním práce na študijné účely.

.....
Gašperek Michal

Obsah

Úvod	8
1 Základná charakteristika problému	10
2 Spôsob výroby vodíka	11
3 Elektrolýza vody	11
3.1 Výsledné produkty elektrolýzy	13
3.2 Vhodné elektrolyty	14
3.3 Konštrukcia elektrolyzéra	16
4 Matematický popis elektrolýzy	18
4.1 Výpočet hmotnosti vylúčenej látky	19
4.2 Výpočet objemu vylúčenej látky	20
4.3 Výpočet objemu pri zmene teploty a tlaku	21
4.4 Výkon elektrolyzéra	22
4.5 Účinnosť elektrolyzéra	23
5 Schéma HHO generátora	24
5.1 Návrh rozmerov elektrolyzéra	26
5.2 Čistenie zmesi HHO	29
5.3 Zásobník H_2O	30
5.4 Zásobník HHO zmesi	32
6 Meranie účinnosti elektrolyzéra	32
6.1 Zostavenie systému na meranie účinnosti	33
6.2 Získané data z merania	36
7 Riadiaca elektronika	39
7.1 Výkonová elektronika	40
7.2 Snímané veličiny	41
7.3 Spôsob riadenia produkcie HHO	45
7.4 Optimálne riadenie výkonu	48
8 Spôsob napájania elektrolyzéra	49
8.1 Alternátor	50
8.2 Seebeckov jav	50

9 Realizácia.....	53
Záver.....	56
Literatúra a odkazy.....	57

Úvod

V dnešnej dobe väčšina dopravných prostriedkov využíva na svoj pohon spaľovanie fosílnych palív. Avšak práve s týmito palivami sa v poslednom čase otvárajú problematické otázky. Dva hlavné problémy fosílnych palív sú ich postupné vyčerpanie a ekologické znečisťovanie emisiami NO_x , CO , CO_2 .

Možností, ako vyriešiť problém s fosílnymi palivami je viac, ale väčšia časť z nich vyžaduje hlbší výskum a teda nedajú sa využiť v blízkej dobe. Táto práca však popisuje spôsob, ktorý sa dá aplikovať na dnes používané zážihové aj vznetrové motory bez zložitejších zásahov do samotného motora a s použitím jednoduchej technológie, ktorá využíva súčasné spaľovanie vodíka s uhl'ovodíkovými palivami. Štúdie, ktorými sa zaoberali viaceré vedecké práce dokázali, že pridaním malého množstva vodíka do 10% spaľovanej zmesi, je možné zredukovať objem spotrebovaného uhl'ovodíkového paliva. Teória, ktorá sa skrýva za celým princípom vychádza z toho, že spaľovaním zmesi vodíka a uhl'ovodíkových palív dochádza k zlepšeniu horľavosti zmesi a skráteniu času horenia zmesi.

Na využitie tohto princípu je však potrebné mať k dispozícii dostatočné množstvo vodíka na palube automobilu alebo iného dopravného prostriedku, využívajúceho spaľovací motor. Asi najjednoduchší spôsob je montáž nádrže s vodíkom. Problém nastáva v tom, že vodík patrí medzi veľmi horľavé a výbušné plyny. Teda pri jeho väčšom úniku by mohlo dôjsť k explózií. Tento fakt je dosť rizikový a tak je snaha nahradiť zásobník s vodíkom systémom, ktorý by vyrábala vodík priamo na palube automobilu v takom množstve, ktoré by sa ihneď spotrebovalo. Išlo by teda o systém výroby vodíka na požiadanie.

Spôsobov ako vyrobiť vodík je viacero. Táto práca sa zaoberá jedným zo spôsobov výroby vodíka. Jedná sa o výrobu za pomoci elektrolýzy vody s prídavkom hydroxidu draselného, ktorý slúži na zvýšenie vodivosti. Práca popisuje samotnú konštrukciu zariadenia na výrobu vodíka – elektrolýzer, návrh jeho výkonu na základne požadovaných hodnôt a zároveň jeho rozmerovú optimalizáciu. Tento krok zabezpečuje výpočet na základe matematického popisu elektrolýzy. Toto zariadenie musí spĺňať určité požiadavky a parametre tak, aby nebol problém s jeho umiestnením do motorového vozidla. Taktiež musí spĺňať určitú produkciu vodíka tak, aby dokázal dostatočne zásobovať motor. Pri návrhu sú zohľadnené ďalšie časti zariadenia, ktoré sú potrebné k správne fungovaniu. Nemenej dôležitou časťou návrhu bol senzorický subsystém, ktorý sleduje potrebné parametre vo vodíkovom generátore a získava aj informácie z automobilu, ktoré sú využité k riadeniu elektrolýzera. Keďže motor nepracuje na konštantnom výkone, musí sa taktiež meniť výkon elektrolýzera v závislosti na požiadavkách motora. Preto nájdeme v časti práce popis, zaoberajúci sa riadením elektrolýzy, ktorý popisuje ako samotnú riadiacu elektroniku, tak i návrh použitej výkonovej elektroniky. Riadenie je dôležité kvôli optimálnemu zásobovaniu, aby zariadenie nevyrábalo nadbytočný vodík vtedy, keď ho nie

je potreba a naopak, aby ho nevyrábalo málo. keď má motor najväčšiu spotrebu. Taktiež riadenie a celý systém výroby vodíka je navrhovaný s ohľadom na čo najmenšie energetické nároky. V práci nájdeme popis viacerých spôsobov ako sa dá elektrolyzér riadiť a zároveň aj ich výhody a nevýhody, pričom podstata je vytvoriť ideálny spôsob vzhľadom na požiadavky.

Záver práce uvádza možnosti zásobovania celého systému elektrickou energiou. Navrhuje využiť odpadové teplo z motora na výrobu elektrickej energie. Týmto spôsobom by sa celý systém zefektívnil a celková účinnosť motora by tak vzrástla.

Celý systém bol navrhovaný pre americkú firmu Hydro Phi, ktorá má zastúpenie aj na Slovensku. Firma sa rozhodla vyvinúť systém na výrobu vodíka pre automobilový priemysel. Jej cieľom je využívať spaľovanie zmesi vodíka s palivom a tak doceliť lepšie spaľovanie. Podstata nie ušetriť na palive, ale znížiť produkované emisie. Veľa prepravných firiem využíva automobily, ktoré majú vyššiu produkciu škodlivých látok ako sú emisné limity. Keby došlo k zníženiu produkovaných emisií u týchto automobiloch, dali by sa ďalej využívať v praktickom živote.

1 Základná charakteristika problému

Základom tejto práce je navrhnuť spôsob získavania vodíku priamo na palube automobilu. Jedná sa hlavne o väčšie motory s vyššími výkonmi a teda aj väčšou spotrebou. Firma sa rozhodla vývoj orientovať na kamióny z dôvodu ich rozšíreniu v preprave tovaru a faktu, že mnohé z nich používajú veľkoobjemové motory, ktorých spotreba a emisie nie sú moc priaznivé.

Keďže použitie sa predpokladá na aftermarket, jedná sa už o existujúci model ťahača, je treba brať do úvahy pri konštrukcii zariadenia fakt, že ho treba rozmerovo a tvarovo navrhnuť tak, aby sa dal bez problémov zabudovať do daného typu ťahača. Pri obhliadke tohto typu vozidla zistíme, že v motorovej časti nie je dostatok priestoru na manipuláciu. Preto bol zvolený priestor pre zabudovanie mimo motorovú časť a potrebné médium, teda vodík sa bude k motoru dopravovať podobne ako palivo - hadicami. Zariadenie môže byť zabudované v priestore skrinky na náradie, ktorá bude prispôbená potrebám zariadenia na výrobu vodíka. Približný náčrt a rozmery skrinky na náradie je na nasledujúcom obrázku. Ďalej je možné zabudovať na zadnú stranu ťahača do priestoru medzi kabínou a návesom alebo zmenšením jednej z palivových nádrží.

Pri samotnej konštrukcii vodíkového generátora treba zvažovať podmienky, v ktorých bude pracovať. Treba sa zamerať hlavne na nasledujúce problémy:

- **Prašnosť, vlhkosť** – kamión sa môže pohybovať v rôznych oblastiach, kde nemôžeme zaručiť stále podmienky. Do systému sa tak môžu dostať nežiadúce nečistoty, prípadne vlhkosť a voda.
- **Výkyv teplôt** – predstavujú zmenu teploty počas dňa, ročných období, ale aj vplyv iných tepelných zdrojov ako motor ťahača, slnečné žiarenie – v danom priestore môže spôsobiť bez problémov teploty nad 50° C.
- **Vibrácie** – spôsobené chodom motora a pohybom ťahača po vozovke. Treba počítať s tým, že sa môžu vyskytnúť nerovnosti na vozovke.

Ďalším dôležitým kritériom pre návrh vodíkového generátora je jeho výkonnosť, ktorú predstavuje objemové množstvo vodíka za určitý čas. Keďže každý motor má iné charakteristiky, nie je možné stanoviť všeobecnú výkonnosť vodíkového generátora. Preto bola výkonnosť zadaná na 5 litrov za minútu (5l/min). Jedná sa o výkonnosť určenú pre testovací typ ťahača.

Výroba celého zariadenia a jeho návrh nie je jednoduchá záležitosť, táto práca popisuje len základný návrh celého zariadenia. Pričom základný návrh neobsahuje presné rozmery jednotlivých navrhnutých častí generátora a ich presnú konštrukčnú podobu. Výkonová elektronika je tiež navrhnutá ako základ, ktorý sa môže v prípade ďalších potrieb prepracovať. Taktiež riadiaca elektronika je popísaná pre všeobecný typ motora automobilu a aj pre všeobecný HHO generátor. Jej určité časti treba odladiť v závislosti na konkrétnej aplikácii generátora. Veci, ktoré nie sú v práci zahrnuté ako napríklad spôsoby

pripojenia a vedenia zmesi HHO, mechanická konštrukcia jednotlivých dielov a ich uchytenie, návrh konkrétnej riadiacej elektroniky, si firma upraví podľa svojich konkrétnych požiadaviek a požiadaviek aplikácie.

2 Spôsoby výroby vodíka

Spôsobov ako vyrobiť vodík je viac. Nie každý je však pre použitie v automobilovom priemysle vhodný. Vhodnosť sa určuje podľa viacerých faktorov ako napríklad energetická náročnosť procesu výroby, možnosti zabudovania systému v automobile atď..

Známejšie spôsoby výroby vodíka:

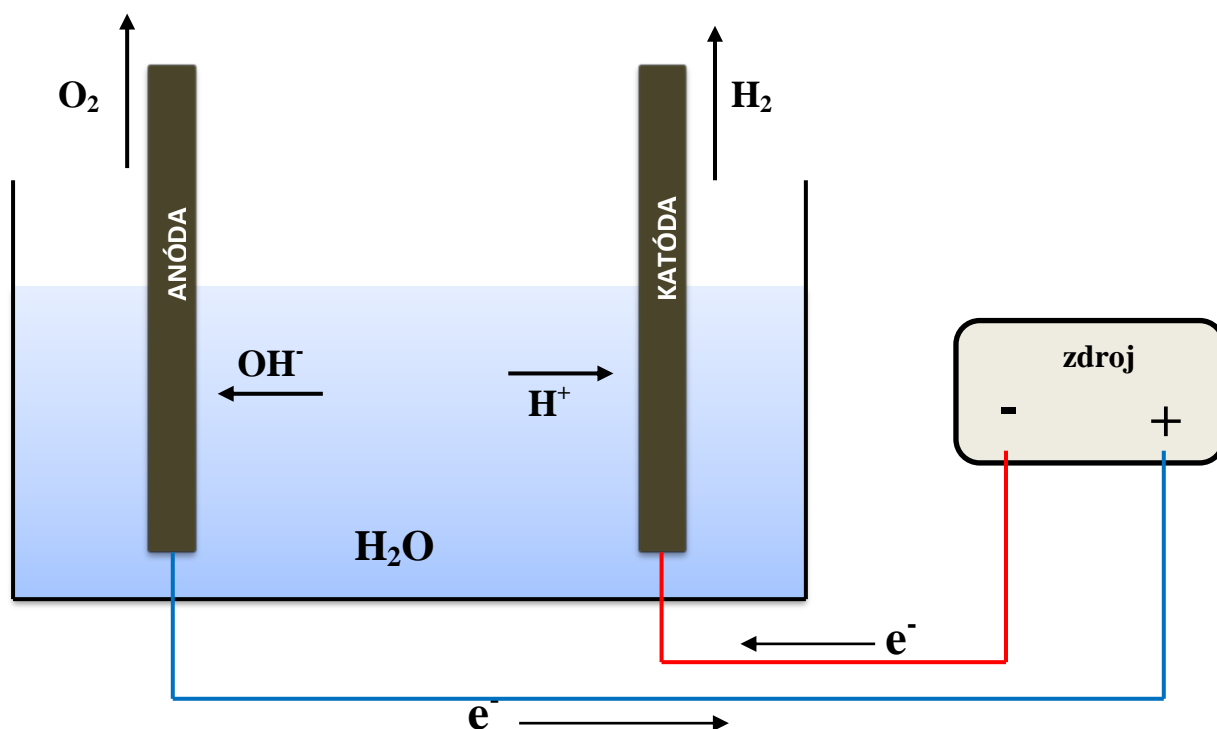
- **Pomocou Kyppovho prístroja** – jedná sa o reakciu neušľachtilých kovov s kyselinami, alebo hydroxidmi
- **Pomocou Hoffmanovho prístroja** – základom je elektrolýza, pri ktorej sa vylučuje vodík na katóde
- **Pri termickom rozklade metánu** – vyžaduje sa vysoká teplota až 1200° C
- **Reakcia vodnej pary s horúcim koksom** – taktiež vysoká teplota 1000° C

Ako bolo už spomínané, pri výbere spôsobu získavania vodíka sa zohľadňovali rôzne kritéria. Po dlhšej úvahe bol vybraný spôsob výroby pomocou elektrolýzy vody. Táto metóda má oproti ostatným mnoho výhod. Medzi jej hlavné výhody patrí jednoduchý proces výroby a použité medium, z ktorého sa získava vodík - voda. Elektrolýzou vody, teda jej rozkladom získavame okrem vodíka aj kyslík. Zložitejším spôsobom je možné tieto dva plyny od seba oddeliť a použiť len vodík. Ale keďže zmes vodíka a kyslíka je účinnejšia ako samotný vodík, bola by škoda nevyužiť to.

Zariadenie na výrobu vodíka pomocou elektrolýzy – elektrolýzer, je z konštrukčného hľadiska najjednoduchšie riešenie. Taktiež cenovo najprístupnejšie. Nevyužíva sa pri ňom vysokých teplôt a nie je za potreby drahých materiálov.

3 Elektrolýza vody

Elektrolýza vody je proces, pri ktorom dochádza k štiepeniu vody za pomoci energie, teda jednosmerného prúdu. Po rozštiepení chemickej väzby, dochádza k rozkladu vody (H_2O), ktorá je v kvapalnom skupenstve a vytvorení vodíka (H_2) a kyslíka (O_2), pričom vylúčené látky sú v plynnom skupenstve. Celkovú reakciu rozkladu vody popisuje rovnica (3.1).



Obr. 3.1 Schéma jednoduché elektrolýzy

Rovnice popisující elektrolýzu vody [12]:

- celková rovnice: $2 H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$ (3.1)
- katodický dej: $2 H_3O^+ + 2e^- \rightarrow H_2 + 2 H_2O$ (3.2)
- anodický dej: $4 OH^- \rightarrow 2e^- + O_2 + 2 H_2O$ (3.3)
- disociácia vody: $2 H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH^-$ (3.4)

Disociácia vody je v podstate dej, pri ktorom dochádza k rozpadu kovalentnej väzby medzi vodíkom a kyslíkom, pričom obidva elektróny z väzby zostanú na atóme kyslíka. Odtrhnutý atóm vodíka stratil svoj jediný elektrón a stáva sa z neho kation vodíka, H^+ . Zvyšná časť molekuly je obohatená o jeden elektrón a stáva sa z nej hydroxylový anión OH^- . Tento jav môžeme prebiehať aj opačným smerom.



Vodíkové kationy s kladným nábojom sú priťahované k časticiam so záporným nábojom. Jednou z možností je, že sú priťahované hydroxylovými aniónmi a prebieha tak reverzná disociácia. Teda opäť vzniká molekula vody. Ďalšia možnosť je, že sú priťahované k čiastkovým záporným nábojom na atónoch kyslíka $O^{\delta-}$. Dochádza tak k vzniku kladne nabitej väzby hydroxóniového iónu:



Katodický dej je dej pri elektrolýze, prebiehajúci na záporne nabitej elektróde, na katóde. Záporný náboj zo zdroja sa zhromažďuje na katóde. Vzniká tak akýsi „tlak“ snažiaci sa tlačiť elektróny cez vodu na druhú stranu k anóde, kde sa zhromažďuje kladný náboj. Molekuly vody v blízkosti katódy disociujú, rozkladajú sa teda na H_3O^+ a OH^- . Elektróny na katóde sú priťahované ku kladným časticiam H_3O^+ . Dochádza k roztrhnutiu väzby medzi vodíkom a zvyškom molekuly, pričom kation vodíka prijme elektrón z katódy a stane sa z neho neutrálny atóm vodíka. Avšak ako je známe, vodík sa ako jednoatómová molekula vo voľnej prírode nenachádza, a tak sa zlučuje s iným atómom vodíka a vytvára dvojatómovú molekulu H_2 . Dej prebiehajúci na katóde nám popisuje rovnica (3.2).

Na druhej strane pri kladne nabitej elektróde prebieha anodický dej. Pri tomto deji je zvyšná časť disociovannej molekuly vody OH^- , teda záporne nabitá časť priťahovaná ku kladnej elektróde. Dochádza k odovzdaniu elektrónu kladne nabitej elektróde. Následne dôjde k rekombinácii hydroxylového iónu s ďalšími tromi hydroxylmi a vzniká tak jedna molekula kyslíka O_2 a dve molekuly vody H_2O . Dej prebiehajúci na anóde nám popisuje rovnica (3.3).

Opačná reakcia nastáva pri horení vodíka. Pri reakcii zvanej horenie sú potrebné dve zložky. A to horľavina, čo je v tomto prípade vodík a oxidačný prostriedok – kyslík. Pri ich horení dochádza k vzniku vody, respektíve vodnej pary a uvoľňovaniu energie.



3.1 Výsledné produkty elektrolýzy

Kyslík

Kyslík je chemický prvok s protónovým číslom 8. Jeho výskyt je na Zemi pomerne veľký. V atmosfére tvorí približne 21% objemu. Vo vode, ktorá pokrýva dve tretiny zemského povrchu, tvorí kyslík viac ako 80% jej hmotnosti. Za bežných podmienok, teda štandardnej teploty a tlaku sa vyskytuje ako dvojatómová molekula O_2 . Jedná sa o bezfarebný plyn, ktorý má v kvapalnom a tuhom stave svetlomodrú farbu. Kyslík je veľmi reaktívny prvok. Jeho reakcie s inými látkami bývajú najčastejšie exotermické, teda také, pri ktorých sa uvoľňuje teplo. Reakciou s vodíkom, horenie zmesi kyslíka a vodíka sa dá dosiahnuť teplota viac ako 3000 °C. [13]

Vodík

Vodík je chemický prvok s protónovým číslom 1. Ide o najrozšírenejší prvok v celom vesmíre a o tretí najrozšírenejší na Zemi. Avšak voľný vodík sa na Zemi nevyskytuje. Môžeme ho nájsť len vo forme zlúčenín. Asi najznámejšia zlúčenina vodíka je voda (H_2O). Vodík ako dvojatómová molekula H_2 je veľmi stabilný. Je to číry

bezfarebný plyn bez chuti a zápachu. Je veľmi horľavý, preto s ním treba zaobchádzať opatrne. [13]

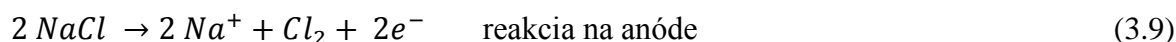
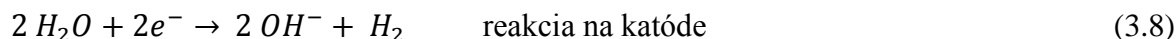
3.2 Vhodné elektrolyty

Keďže destilovaná voda je v podstate nevodivá, elektrolyza za použitia destilovanej vody by prebiehala veľmi ťažko. Preto musíme do nej pridať zložku, ktorá nám zaručí vodivosť. Táto zložka sa volá elektrolyt. Je to v podstate vodič v ktorom sa náboj prenáša pohybom iónov. Pri elektrolyze sa môžu použiť ako elektrolyty rôzne látky. Avšak nie všetky používané elektrolyty sú vhodné.

NaCl

Asi najpoužívanější elektrolyt pri demonštrácii elektrolyzy v školských pokusoch je kuchynská soľ (NaCl). Jedná sa o lacný a prístupný elektrolyt. Avšak nie je moc šetrný k častiam elektrolyzéra. Soľ ako taká spôsobuje koróziu, navyše pri reakcii tvorí hnedo-oranžovú hmotu vo forme malých lupienkov, ktoré spôsobujú zanášanie zariadenia a tak zmenšujú jeho výkonnosť. Hlavným problémom nie je ani tak zanášanie a korózia, ale vedľajší produkt vytváraný pri reakcii.

Chemická reakcia:

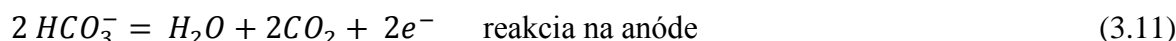
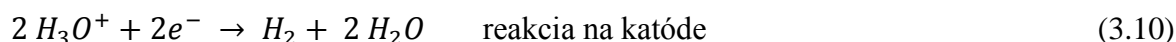


Ako vidíme z reakcie, na katóde sa síce vytvára vodík, ale na opačnej anóde pri rozklade NaCl vzniká chlór (Cl₂). Jedná sa o žltozelený plyn, veľmi jedovatý a spôsobujúci poleptanie. Z týchto dôvodov je použitie soli úplne nevhodné.

NaHCO₃

Alebo inak známa ako jedlá sóda. Je bežne dostupná a lacná. Pri jej použití sa môže elektrolyt zafarbiť do hneda, taktiež môže spôsobiť povlak hnedého zafarbenia na elektródach. Pri elektrolytickej reakcii vytvára CO₂ (približne 30%) a CO (približne 4%). Z dôvodu týchto látok je tiež jej použitie nevhodné.

Chemická reakcia:



NaOH

Hydroxid sodný je anorganická zlúčenina so silne zásaditými vlastnosťami. V čistej forme sa vyskytuje ako pevná biela látka tvoriaca malé útvary podobné kamienkom. Hydroxid sodný je pomerne lacný a dostupný. Pri použití v elektrolyzéři ostávajú elektródy čisté bez usadenín, v elektrolyte nevytvára nežiaduce zafarbenie a prímеси. Pri reakcii neprodukuje vedľajšie produkty. Dostávame tak 95% - 100% čistú zmes HHO, a však pri práci s ním treba zachádzať opatrne, pretože je to veľmi silná žieravina a zdraviu škodlivá látka.

Chemická reakcia:

**KOH**

Hydroxid draselný je látka veľmi dobre rozpustná vo vode. Patrí medzi silné hydroxidy. Vyskytuje sa vo forme veľmi podobnej hydroxidu sodnému. Taktiež pri elektrolyze nevytvára žiadne usadeniny ani zafarbenie. Jedná sa o veľmi silný a čistý elektrolyt. Pri elektrolytickej reakcii nevytvára vedľajšie produkty. Pri manipulácii s ním však treba byť opatrný, keďže sa jedná o veľmi silnú žieravinu. Hydroxid draselný v určitej koncentrácii slúži aj ako nemrznúca zmes. Teda môžeme povedať, že znižuje teplotu mrznutia vody a tak prispieva k možnosti prevádzky elektrolyzéra aj za nízkych teplôt pod bodom mrazu vody. Jednotlivé body mrznutia v závislosti na koncentrácii hydroxidu draselného vo vode nájdeme v nasledujúcej tabuľke.

Chemická reakcia:



% KOH vo H ₂ O	Bod mrznutia °C	Bod mrznutia °F
0	0.0	32
10	-3.7	25.4
20	-8.3	17.1
30	-14.2	6.4
40	-22.1	-7.8
50	-33.1	-27.7

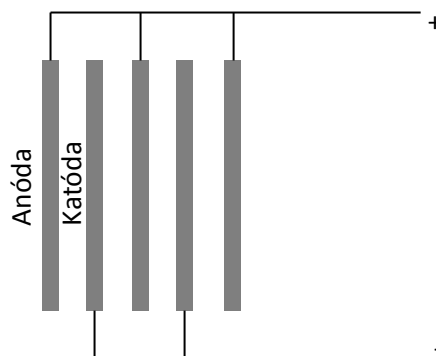
Tabuľka 3.1 Tabuľka teplôt mrznutia vody a KOH pri určitej koncentrácii (prevzaté z [9])

Z predchádzajúcich zistení vyplýva, že najvhodnejšie elektrolyty sú hydroxid sodný a draselný. Pri ich reakcii sa nevytvárajú žiadne vedľajšie produkty a nedochádza k znehodnocovaniu elektród. Veľkou výhodou použitia KOH je, že znižuje bod mrznutia vody. Elektrolyzér sa tak môže používať aj v miestach, kde mrzne. Pri zachádzaní s ním treba byť však opatrný. Hydroxid draselný nesmie unikať z elektrolyzéra. V prípade úniku musí byť zariadenie konštruované tak, aby došlo k jeho zachyteniu a nemohol teda uniknúť zo zariadenia. Samozrejme existuje rada ďalších rôznych látok, použiteľných pre elektrolýzu. Pre nás však pre svoje kladné vlastnosti pripadá ako vhodný práve hydroxid draselný (KOH).

3.3 Konštrukcia elektrolyzéra

Elektrolyzér znázornený na obrázku 3.1 je možné používať v laboratóriu a to len na demonštráciu vytvárania vodíka a kyslíka počas elektrolýzy. Pokiaľ však chceme použiť elektrolyzér v iných podmienkach ako laboratórnych, musíme zvoliť inú konštrukciu elektrolyzéra. Samotnú konštrukciu môžeme rozdeliť na dve časti. Prvá časť je spôsob zapojenia elektród na zdroj. Druhá je samotná konštrukcia a uloženie elektród v elektrolyzéri.

Z hľadiska zapojenia elektród rozoznávame dva základné typy zapojení. Jedná sa o zapojenie unipolárne a bipolárne zapojenie elektród. Pri unipolárnom zapojení elektród sa strieda polarita na jednotlivých elektródach. Elektródy sú v podstate zapojené paralelne.



Obr. 3.2 Unipolárne zapojenie elektród

Unipolárne zapojenie elektród je charakterizované tým, že vždy medzi dvoma elektródami je napätie o veľkosti napájacieho napätia. Pri tomto zapojení sa pracuje s väčšími prúdmi.

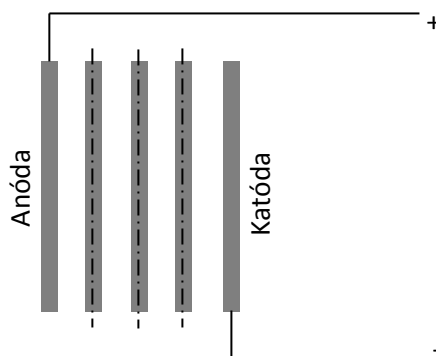
$$U_{\text{elektróda}} = U_c \quad (3.18)$$

Bipolárne zapojenie je charakterizované tým, že na zdroj sú pripojené len krajné elektródy. Stredné elektródy sa správajú bipolárne, vždy je jedna polovica katóda a druhá je anóda. Pri tomto zapojení je medzi jednotlivými elektródami menšie napätie ako pri unipolárnom a závisí od počtu elektród.

$$U_{\text{elektroda}} = (n - 1) \cdot U_C \quad (3.19)$$

kde

- n – počet elektrod elektrolyzéra

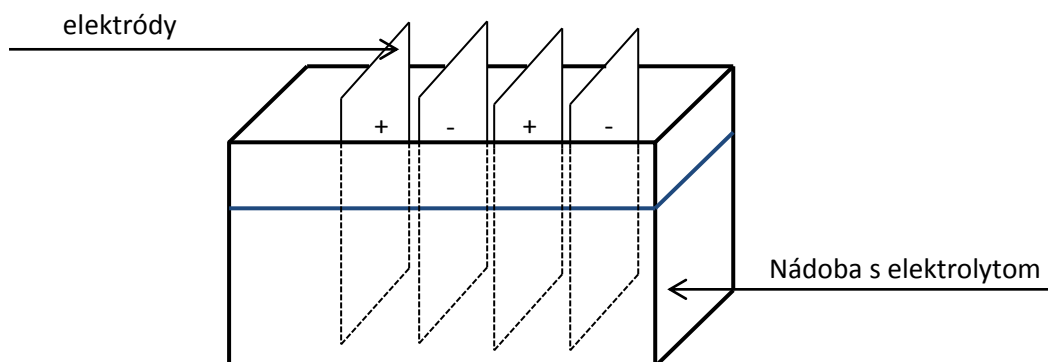


Obr. 3.3 Bipolárne zapojenie elektrod

Hlavným rozdielom je v týchto zapojeniach veľkosť prúdu. Pri použití rovnakého napájacieho napätia je pri unipolárnom zapojení medzi dvoma elektródami väčší prúd. Avšak našim cieľom je dostať napätie medzi dvoma elektródami v rozpätí 1.3 až 2 V. Pri dosiahnutí rovnakého napätia medzi elektródami na oboch typoch zapojení nám bude pretekať rovnaký prúd cez elektrolyt, avšak celkový prúd pri unipolárnom zapojení je väčší. Preto je pre nás výhodné bipolárne zapojenie.

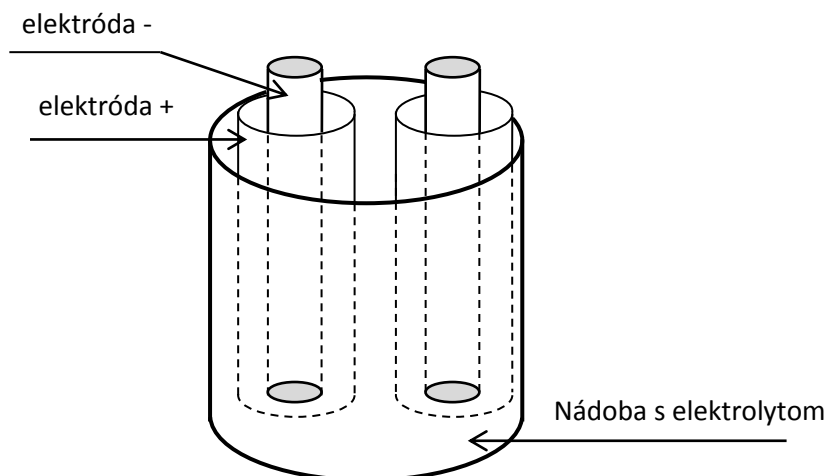
V rôznych aplikáciách nájdeme kombinované zapojenie. Kombináciu sériového a paralelného zapojenia. Ide o zapojenie, kedy sú bloky sériového zapojenia (bipolárne zapojenie) zapojené paralelne. Tento typ zapojenia sa využíva hlavne vo veľkých elektrolyzéroch na výrobu veľkého množstva zmesi kyslíka a vodíka.

Elektrody môžu mať rôzny tvar. Spravidla sú najčastejšie používané elektródy ploché a tvaru medzikružia. Ploché elektródy sú v podstate kovové platne uložené plochou stranou voči sebe. Elektródy sú od seba oddelené dištančnou vložkou z nevodivého materiálu. Celá zostava elektrod je následne ponorená do nádoby s elektrolytom.



Obr. 3.4 Elektrolyzér s plochými elektródami v nádobe s elektrolytom

Ďalšia možnosť je použiť duté valcové elektródy. Pričom sú jednotlivé elektródy vsunuté do seba. Takýchto elektród môže byť zapojených v jednom systéme viac. Zostava je následne tak ako pri predošlom type ponorená do nádoby s elektrolytom.



Obr. 3.5 Elektrolyzér s valcovými elektródami v nádobe s elektrolytom

Hlavná nevýhoda predchádzajúceho zapojenia je v tom, že elektródy musia byť umiestnené v nádobe s elektrolytom. Pre použitie v automobilovom priemysle, nie je tento spôsob príliš vhodný a konštrukcia samotného elektrolyzéra musí byť prevedená ako uzavreté zariadenie.

Vhodný spôsob konštrukcie je taký, pri ktorom je elektrolyt uzavretý medzi elektródami. Elektródy, najlepšie plochého tvaru, tak tvoria obal celého elektrolyzéra. Medzi nimi sa nachádza tesnenie, slúžiace jednak ako dištančná vložka medzi elektródami a zároveň ako zábrana proti uniknutiu elektrolytu spomedzi elektród. Elektródy v takto konštruovanom zariadení musia mať otvori, aby sa vyprodukované látky dostali von zo zariadenia.

4 Matematický popis elektrolýzy

Hmotnosti jednotlivých látok vylúčených pri elektrolýze zistíme pomocou Faradayových zákonov elektrolýzy, ktoré hovoria, že hmotnosť látky vylúcenej na elektróde z elektrolytu, je priamo úmerná náboju Q , ktorý prešiel počas elektrolýzy cez elektrolyt. [14] Platí teda nasledujúci vzťah:

$$m = A \cdot Q \quad (4.1)$$

kde

- Q - veľkosť náboja, ktorý prešiel elektrolytom
- A - konštanta vyjadrujúca elektrochemický ekvivalent danej látky, samozrejme pre rôzne látky sa konštanta líši

Pre výpočet elektrochemického ekvivalentu látky platí vzťah:

$$A = \frac{M_m}{F \cdot v} \quad (4.2)$$

kde

- M_m - predstavuje molárnu hmotnosť látky, teda veličina udávajúca hmotnosť jedného mólu látky
- F - vyjadruje Faradayovu konštantu, ktorá značí elektrický náboj jedného mólu elektrónov
- v - značí počet elektrónov potrebných k vylúčeniu jednej molekuly látky.

Dosadením rovnice (4.2) do rovnice (4.1) dostávame vzťah pre hmotnosť vylúčenej látky počas elektrolýzy:

$$m = \frac{M_m \cdot Q}{F \cdot v} \quad (4.3)$$

4.1 Výpočet hmotnosti vylúčenej látky

V našom prípade sa jedná o elektrolýzu vody, teda H_2O . Pri danej elektrolýze sa vodík a kyslík vylučuje v dvojatómových molekulách, teda H_2 a O_2 . Ako vidíme musíme spočítať hmotnosť vylúčeného vodíka a kyslíka. Pre celkovú hmotnosť vylúčenej zmesi platí vzťah:

$$m_{celk.} = m_H + m_O \quad (4.4)$$

Vyjadríme si vzťah pre výpočet hmotnosti vodíka (4.5) a vzťah pre výpočet hmotnosti kyslíka (4.6). Výsledné vzťahy dosadíme do rovnice pre celkovú hmotnosť vylúčeného plynu (4.4) a po úprave dostávame vzťah (4.7).

$$m_H = \frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot v_H}, m_O = \frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot v_O} \quad (4.5), \quad (4.6)$$

$$m_{celk.} = \frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot v_H} + \frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot v_O} = \frac{Q}{F} \left(\frac{M_{mH}}{v_H} + \frac{M_{mO}}{v_O} \right) \quad (4.7)$$

kde

- $M_{mH} = 2 \cdot 1,008 \text{ g/mol}$
- $M_{mO} = 2 \cdot 15,9994 \text{ g/mol}$
- $v_H = 2$
- $v_O = 4$
- $F = 96485 \text{ C/mol}$

Hodnoty uvedené vyššie sú prevzaté z periodickej tabuľky [10].

V danej rovnici už poznáme všetky veličiny okrem elektrického náboja Q . Keďže počas elektrolýzy môžeme merať prúd, ktorý prechádza elektrolytom, dá sa celkový náboj, ktorý elektrolytom prešiel za určitý čas t vyjadriť následovným vzťahom (4.8):

$$Q = I \cdot \Delta t \quad (4.8)$$

Po dosadení už známych veličín do vzťahu pre výpočet celkovej hmotnosti vylúčeného plynu (7), dostaneme vzťah pre výpočet hmotnosti vylúčenej zmesi pri danom prúde I za daný čas t :

$$m_{celk.} = \frac{9,0077 \cdot (I \cdot \Delta t)}{96485} [g] \quad (4.9)$$

Pomocou predchádzajúceho vzťahu môžeme teda vypočítať hmotnosť vylúčenej zmesi kyslíka a vodíka. I keď je pre nás táto hodnota dôležitá, v praxi sa s ňou ťažko pracuje. Meranie hmotnosti plynu je náročné. Oveľa jednoduchšie je merať objem plynu a preto je potrebné vyjadriť vzťah pre výpočet objemu vyprodukovanej zmesi plynu.

4.2 Výpočet objemu vylúčenej látky

Pri zostavovaní rovníc využijeme to, že kyslík aj vodík sú plyny, ktoré majú za rovnakých podmienok - teplota a tlak, rovnaký mólový objem V_m . Pre objem vylúčeného množstva látky platí nasledujúci vzťah:

$$V = n \cdot V_m \quad (4.10)$$

kde

- n – látkové množstvo danej látky, teda počet mólov

Látkové množstvo vypočítame ako pomer hmotnosti vylúčenej látky a molárnej hmotnosti danej látky:

$$n = \frac{m}{M_m} \quad (4.11)$$

Po dosadení dostávame vzťah pre objem vylúčenej látky:

$$V = \frac{m}{M_m} \cdot V_m \quad (4.12)$$

Keďže ako pri hmotnosti, tak aj pri objeme pracujeme so zmesou dvoch plynov, musíme celkovú hmotnosť danej zmesi kyslíka a vodíka počítať ako súčet objemu vylúčeného vodíka a objemu vylúčeného kyslíka:

$$V_{celk.} = V_H + V_O \quad (4.13)$$

Pre objem vylúčeného vodíka platí:

$$V_H = \frac{m_H}{M_{mH}} \cdot V_m \quad (4.14)$$

Dosadíme vzťah (4.5) pre výpočet hmotnosti vyprodukovaného vodíka a dostaneme:

$$V_H = \frac{\frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot v_H}}{M_{mH}} \cdot V_m = \frac{Q}{F \cdot v_H} \cdot V_m \quad (4.15)$$

Pre objem vylúčeného kyslíka platí:

$$V_O = \frac{m_O}{M_{mO}} \cdot V_m \quad (4.16)$$

Dosadíme vzťah (4.6) pre výpočet hmotnosti vyprodukovaného vodíka a dostaneme:

$$V_O = \frac{\frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot v_O}}{M_{mO}} \cdot V_m = \frac{Q}{F \cdot v_O} \cdot V_m \quad (4.17)$$

Dosadením vzťahov (4.16) a (4.17) do vzťahu (4.13) dostaneme vzťah pre výpočet celkového objemu zmesi plynu vodíka a kyslíka

$$V_{celk.} = \frac{Q}{F \cdot v_H} \cdot V_m + \frac{Q}{F \cdot v_O} \cdot V_m = \frac{(I \cdot \Delta t)}{F} \cdot V_m \cdot \left(\frac{1}{v_H} + \frac{1}{v_O} \right)$$

$$V_{celk.} = \frac{(I \cdot \Delta t)}{F} \cdot V_m \cdot \left(\frac{1}{v_H} + \frac{1}{v_O} \right) \quad [litre] \quad (4.18)$$

Prípadne vzťah môžeme ešte zjednodušiť pri použití hustoty vodíka a hustoty kyslíka. Vzťah bude vyzerat' nasledovne:

$$V_{celk.} = \frac{m_H}{\rho_H} + \frac{m_O}{\rho_O} \quad (4.19)$$

kde

- $\rho_O = 1,409 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pri 0 °C a 100,000 kPa
- $\rho_H = 0,08895 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pri 0 °C a 100,000 kPa

Hodnoty hustoty vodíka a kyslíka sú prevzaté z chemickej tabuľky [10].

4.3 Výpočet objemu pri zmene teploty a tlaku

Ako vidíme dané, hustoty sú udávané pre určitú teplotu a určitý tlak. Pri zmene teploty a tlaku sa hustota plynu mení. S rastúcou teplotou hustota plynu klesá a s rastúcim

tlakom naopak hustota plynu rastie. Tieto poznatky sú pre meranie dôležité. To znamená že pri meraní zohľadňovať vonkajšie podmienky.

Vzťah pre zmenu hustoty pri tlaku p a teplote t :

$$\rho = \left(\frac{\rho_0}{\gamma \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (4.20)$$

kde

- $\gamma = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273,15 \text{ K}} = 0,00366 \text{ K}^{-1}$
- $T = 273,15 + t$

Potom pre objem vylúčenej zmesi plynu za teploty t a tlaku p :

$$V_{celk.} = \frac{m_H}{\left(\frac{\rho_H}{\gamma \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)} + \frac{m_O}{\left(\frac{\rho_O}{\gamma \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)} [\text{litre}] \quad (4.21)$$

4.4 Výkon elektrolyzéra

U väčšiny elektrických zariadení sa pre porovnanie určuje výkon zariadenia. Inak to nie je ani pri výrobe zmesi vodíka a kyslíka v elektrolyzéri. Avšak výkon elektrolyzéroov sa nemeria vo wattoch, ale ako MMW čo je v podstate objem plynu v mililitroch vyprodukovaný za jednu minútu pri určitom príkone vo wattoch. Teda jednotka je milliliter za minútu na jeden Watt. Dá sa teda vypočítať nasledovne:

$$MMW = \frac{V_{celk.}}{U \cdot I} \left[\frac{\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}}{\text{W}} \right] \quad (4.22)$$

kde

- $V_{celk.}$ – objem zmesi HHO v mililitroch vyprodukovanej za jednu minútu

Keďže výkon elektrolyzéra meraný v MMW je závislý od aktuálnej teploty a tlaku, udáva sa vždy pre konkrétne podmienky. Teda výkon určitého elektrolyzéra môže byť za rôznych podmienok odlišný. Je to z dôvodu, že plyn pri zmene teploty a tlaku mení svoj objem. Hodnota, ktorá sa pri týchto zmenách nemení je hmotnosť plynu. Je teda lepšie počítať výkonnosť elektrolyzéra s hmotnosťou vyprodukovanej zmesi namiesto s objemom. Po úprave dostaneme vzorec:

$$GMW = \frac{m_{celk.}}{U \cdot I} \left[\frac{\text{g} \cdot \text{min}^{-1}}{\text{W}} \right] \quad (4.23)$$

kde

- $m_{celk.}$ – hmotnosť zmesi HHO v gramoch vyprodukovanej za jednu minútu

Je oveľa praktickejšie používať vzorec na výkon elektrolyzéra GMW, pri ktorom nemusíme brať do úvahy vonkajšie podmienky a je tak vhodnejší hlavne pri porovnávaní výkonu elektrolyzéra za rôznych prevádzkových podmienok, kedy nám na porovnanie stačí dané hodnoty výkonu porovnať bez nutnosti prevádzkania hodnoty na rovnaké prevádzkové podmienky.

4.5 Účinnosť elektrolyzéra

Pod pojmom účinnosť elektrolyzéra sa rozumieme pomer reálneho výkonu elektrolyzéra k teoretickej hodnote výkonu, ktorá je počítaná pri ideálnych podmienkach. Účinnosť elektrolyzéra môžeme teda zapísať ako:

$$\eta_{HHO} = \frac{MMW}{MMW'} \text{ alebo } \eta_{HHO} = \frac{GMW}{GMW'} \quad (4.24)$$

kde

- MMW – reálny objemový výkon elektrolyzéra
- MMW' – vypočítaný objemový výkon elektrolyzéra
- GMW – reálny hmotnostný výkon elektrolyzéra
- GMW' – vypočítaný hmotnostný výkon elektrolyzéra

Obidva vzorce sú pri výpočte účinnosti rovnocenné. Vzorce je možné pre naše výpočtové potreby zjednodušiť. A to nasledovne:

$$\eta_{HHO} = \frac{\frac{V_{celk.}}{U \cdot I}}{\frac{V'_{celk.}}{U \cdot I}} = \frac{V_{celk.}}{V'_{celk.}} \cdot 100 [\%] \quad (4.25)$$

kde

- $V_{celk.}$ – celkový nameraný objem vyprodukovanej zmesi
- $V'_{celk.}$ – celkový vypočítaný objem vyprodukovanej zmesi

Keďže je príkon v oboch prípadoch rovnaký, stačí teda porovnať hodnoty reálneho množstva objemu vyprodukovanej zmesi k teoretickému objemu zmesi.

Pri meraní účinnosti treba dávať pozor, pretože sa môže stať, že nameráme účinnosť väčšiu ako 100%. To spôsobuje chyba v meraní. Zmes HHO môže obsahovať vodnú paru, ktorá sa tvorí pri zvýšenej teplote elektrolytu (dochádza k odparovaniu vody).

Je teda treba pred samotným meraním zmes plynu ochladiť a separovať vodu a vodnú paru, aby sa vodná para vyzrážala zo zmesi a ostala tak len čistá zmes HHO.

Samotnú účinnosť elektrolyzéra ovplyvňuje viacero faktorov. Jedným z hlavných faktorov je veľkosť napätia na článku. Napätie presahujúce rozkladné napätie elektrolytu, čo je približne 1.2 V, spôsobuje zahrievanie elektrolyzéra, pričom so vzrastajúcou teplotou rastie aj jeho odpor a teda klesá prúd prechádzajúci elektrolytom, čo následne znižuje výkon. V tom prípade je nutné väčšie chladenie celého elektrolyzéra, aby sa teplota udržala v rozumných hodnotách. I keď nadmerne zvýšená teplota sa dá vyriešiť chladením elektrolyzéra, je pre nás výhodnejšie zostaviť elektrolyzér s menšími stratami na teple a tak ušetriť celkovú energiu na výrobu zmesi HHO.

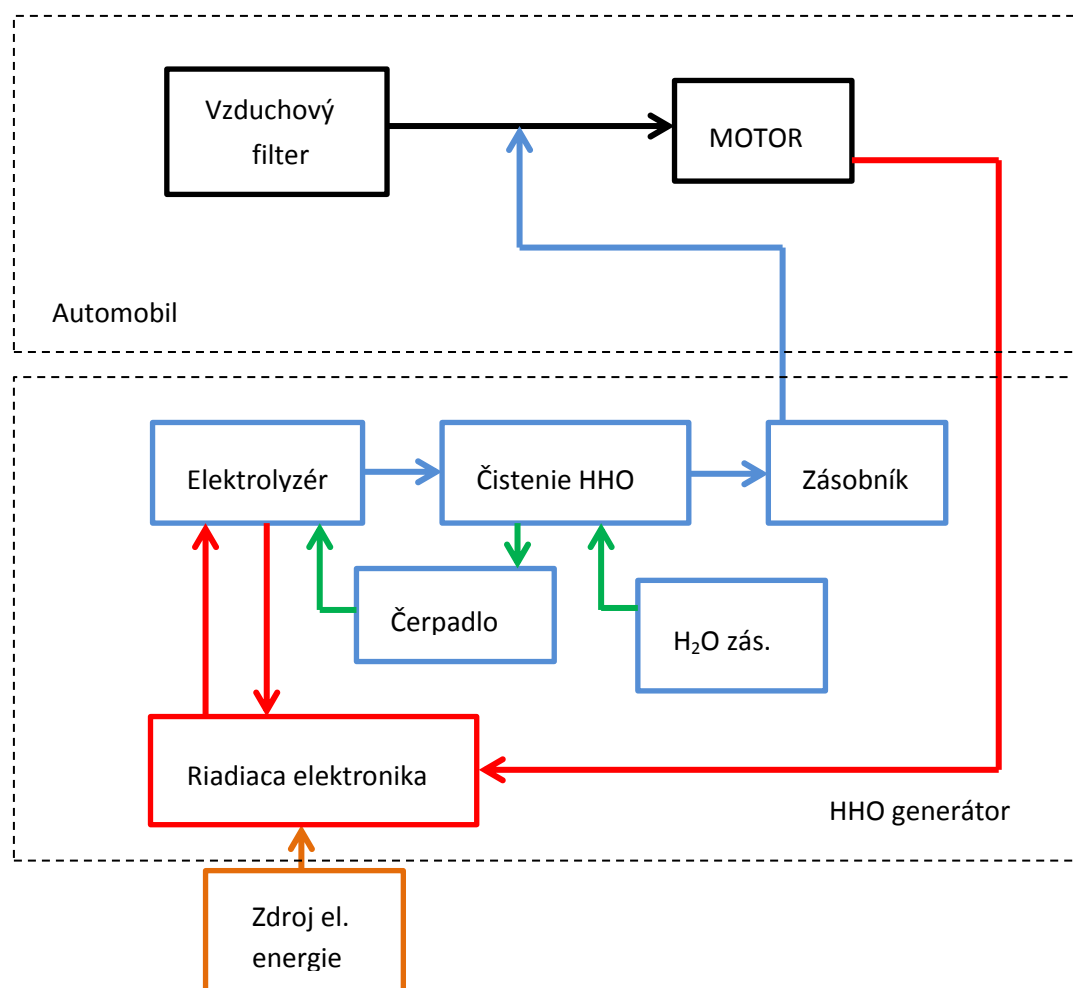
Ďalším z faktorov sú samotné elektródy. Elektródy musia byť jednak z dobre vodivého materiálu, teda s malým merným odporom a z materiálu, ktorý nereaguje so žiadaným z produktov elektrolýzy a ani so samotným elektrolytom. Veľký odpor materiálu by spôsoboval tepelné straty, ktorých nevýhody sme si vysvetlili v predchádzajúcom odstavci. Keby bol materiál i keď len slabo reaktívny s elektrolytom alebo s produktom elektrolýzy, dochádzalo by k usádzaniu niektorého z prvkov na povrchu elektród, čo by spôsobilo zanášanie elektród a zníženie vodivosti. Prípadne by sa zmenšovala medzera medzi dvoma elektródami, čo by malo tiež nežiaduci účinok a časom by strácal elektrolyzér výkon až by bol nakoniec úplne nepoužiteľný. Okrem materiálu je taktiež dôležitý tvar elektród, respektíve ich plocha. Platí, že čím väčšiu plochu majú, tým je výkonnosť a teda aj účinnosť elektrolyzéra väčšia. Pri elektrolýze vody sú jej produkty uvoľňované vo forme plynov, ktorých bublinky sa môžu zachytávať na stenách elektród. To spôsobuje zmenšovanie aktívnej plochy elektród a funguje to ako izolant. Teda elektrolyzérom preteká menší prúd. Toto sa dá obmedziť vhodným zdrsnením povrchu elektród a núteným obehom elektrolytu v elektrolyzéri, vytvárajúcim prúd, ktorý strháva bublinky z elektród a tým ich v podstate čistí.

Vhodná voľba elektrolytu má tiež vplyv na výkon elektrolyzéra. Tak isto ako elektródy, nesmie byť reaktívny s vodou a ani s elektródami. Pri rozklade nesmie vytvárať iné prvky, teda výsledná zmes by mala byť čo najčistejšia zmes vodíka a kyslíka. Pri použití nesprávneho elektrolytu by mohlo dôjsť k úniku nežiaducich látok do ovzdušia. Taktiež by dochádzalo k postupnému hmotnostnému úbytku elektrolytu. Pri zvolení vhodného elektrolytu nedochádza k nežiaducej reakcii a jeho hmotnostné množstvo sa pri reakcii zachováva, čo prispieva k zníženiu nárokov na údržbu samotného elektrolyzéra.

5 Schéma HHO generátora

Na nasledujúcom obrázku je zobrazená schéma vodíkového generátora. Z hľadiska návrhu môžeme návrh rozdeliť na tri nezávislé časti:

- **Automobil** – táto časť nám predstavuje samotný automobil, časť v ktorej nie je možná žiadna veľká zmena a v podstate sa v tejto časti bude jednať len o spojenie HHO generátora s automobilom. Jedná sa o spojenie toku vyprodukovanej zmesi plynov z elektrolyzéra do motora a získavanie informácií potrebných k riadeniu elektrolýzy.
- **HHO generátor** – najdôležitejšia časť tejto práce. Popisuje návrh generátora plynu HHO spolu s riadením výkonu produkcie na základe nameraných dát z automobilu. Môžeme ho chápať ako samostatný prvok, ktorého vstupom sú vstupné údaje a výstupom je samotná zmes plynov určitého množstva vyrobeného za určitý čas.
- **Zdroj elektrickej energie** – v prírode je potrebná na vykonávanie rôznych dejov energia. Inak to nie je ani s výrobou HHO plynu. Energetická náročnosť procesu výroby vodíka a spôsob získavania energie nám bude určovať požiadavky na generátor v automobile. Snahou je navrhnúť taký zdroj energie, aby bol generátor sebestačný.



Obr. 5.1 Schéma HHO generátora

Ako vidieť zo schémy HHO generátora, jeho návrh je rozdelený do viacerých častí a to:

- Elektrolyzér
- Čistenie HHO
- Zásobník HHO
- Zásobník H_2O
- Obehové čerpadlo
- Riadiaca elektronika

V schéme sú znázornené aj dôležité spojenia jednotlivých prvkov generátora. Tie najdôležitejšie sú preprava vyrobeného HHO z generátora k motoru ťahača a informačné spojenie s motorom a riadiacou elektronikou.

Zdroj elektrickej energie, ktorá je potrebná pre napájanie elektrolyzéra, je vyčlenený z oboch celkov, ako z automobilu tak z generator, a to z dôvodu viacerých možností jeho realizácie. Spôsob a realizácia napájania sa bude riešiť v neskoršej kapitole.

5.1 Návrh rozmerov elektrolyzéra

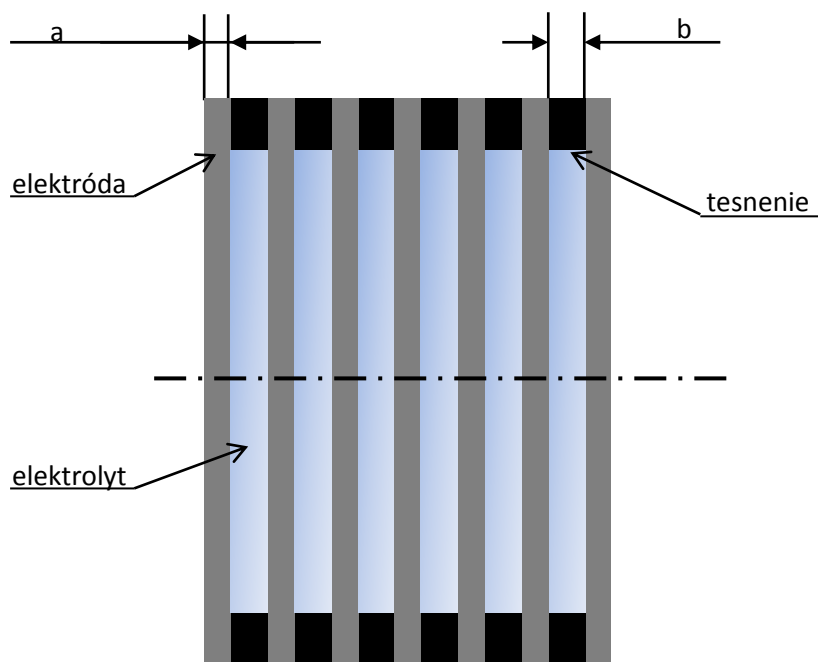
Základ celého HHO generátora tvorí samotný elektrolyzér, teda časť, kde sa bude za pomoci elektrolýzy rozkladať voda na vodík a kyslík. Ako základ bol pre vytvorenie elektrolyzéra použitý pokus s elektrolýzou demonštrovaný v predchádzajúcej kapitole. Problém nastáva v tom, že pri použitom pokuse je celá sústava otvorená a tak zmes plynu uniká do ovzdušia. Elektrolyzér musí byť uzavretý a upravený tak, aby sa plyn dostával von len cez určený ventil. Uzavretie je tiež dôležité z bezpečnostných dôvodov, keďže sa používa v elektrolyzéri KOH, teda kvapalina, ktorá by pri vyliati mohla spôsobiť poškodenie častí automobilu, prípadne vážne zranenie.

Samotný elektrolyzér bude v podstate tvoriť skupina elektrolyzéro. V našom prípade ide o šesť sériovo zapojených elektrolyzéro. Teda môžeme povedať, že ide o šesť komôr. Pri tomto usporiadaní sa zníži napätie na komoru približne na 2,25 V. Veľkosť napätia na elektrolyzéri nie je pre nás dôležitá. Dôležitý prúd prechádzajúci cez elektrolyt. Snažíme sa teda znížiť napätie na jednu komoru tak, aby bolo čo najmenšie, ale zároveň aby bolo väčšie ako rozkladné napätie, teda napätie, pri ktorom začne elektrolytom prechádzať elektrický prúd.

Elektrody tvoria kovové pláty z nerezovej ocele typu 316L. Vonkajšie elektródy obsahujú otvor pre ventil. Na jednej strane vstupný ventil pre vstup z obehového čerpadla a na druhej strane výstupný ventil, pre hadicu smerujúcu do čističky HHO. Vnútorne elektródy majú kruhové otvory zabezpečujúce cirkuláciu elektrolytu a plynu HHO medzi jednotlivými komorami.

Medzi jednotlivými elektródami je priestor, ktorý vyplňuje elektrolyt. Požadovanú vzdialenosť medzi elektródami zabezpečuje tesnenie, ktoré zároveň slúži aj ako tesniaci materiál medzi elektródami a zabezpečuje, aby sa z elektrolyzéra nedostal von elektrolyt ani HHO zmes. Tesnenie musí byť odolné voči KOH – guma NBR týmto požiadavkám vyhovuje.

Keďže elektródami prechádza elektrický prúd, je celý elektrolyzér uložený v plastovom puzdre, slúžiacom ako izolant medzi elektrolyzérom a okolím. Keby nebolo zariadenie izolované, pri manipulácii by mohlo dôjsť ku skratu.



Obr. 5.2 Nákres elektrolyzéra

Pre zadaný objem produkovaného plynu musí prechádzať elektrolyzérom prúd I o veľkosti 50 A. Hodnota je daná z výpočtov a z neskorších meraní, ktoré sú uvedené v ďalších kapitolách. To aké veľké majú byť elektródy a koľko elektrolytu sa má v elektrolyzéri nachádzať, vypočítame za pomoci Ohmovho zákona. Teda zo známeho napätia a prúdu si vypočítame celkový odpor elektrolyzéra. Následovne nadimenzujeme elektródy a bunky medzi elektródami tak, aby mali žiadaný odpor $R_{celk.}$.

$$R_{celk.} = \frac{U}{I} \quad (5.1)$$

Kde

- $U = 14V$
- $I = 50A$

Celkový odpor elektródy vypočítame podľa nasledujúceho vzťahu:

$$R_{elektróda} = \rho_{316L} \cdot \frac{a}{S_{elektróda}} \quad (5.2)$$

kde

- ρ_{316L} – vyjadruje rezistivitu materiálu, v našom prípade materiál 316L
- $S_{elektróda}$ – prierez vodiča, v našom prípade ide o plochu elektródy
- a – hrúbka elektródy

Obdobne vypočítame aj odpor elektrolytu:

$$R_{elektrolyt} = \rho_{elektrolyt} \cdot \frac{b}{S_{elektrolyt}} \quad (5.3)$$

kde

- $\rho_{elektrolyt}$ – merný elektrický odpor elektrolytu
- $S_{elektrolyt}$ – aktívny prierez elektrolytom
- b – hrúbka vrstvy elektrolytu medzi dvoma elektródami

Nami navrhovaný elektrolyzér má šesť článkov, ako je možné vidieť na obrázku. Obsahuje sedem elektród a šesť komôr medzi elektródami, ktoré sú naplnené elektrolytom. Z predchádzajúcich dvoch vzorcov a z poznatku o konštrukcii elektrolyzéra môžeme odvodiť vzorec pre celkový odpor elektrolyzéra:

$$R_{celk.} = 7 \cdot R_{elektróda} + 6 \cdot R_{elektrolyt} \quad (5.4)$$

Pre jednoduchosť výpočtu môžeme považovať $S_{elektrolyt} = S_{elektróda} = S$, potom dosadením a následnou úpravou dostaneme vzťah:

$$R_{celk.} = \frac{1}{S} (7 \cdot \rho_{316L} \cdot a + 6 \cdot \rho_{elektrolyt} \cdot b) \quad (5.5)$$

Neznáme veličiny vo vzorci sú $\{S, a, b\}$. Teda jednoznačne sa rozmery elektrolyzéra vypočítať nedajú a tak budeme musieť dve veličiny zvoliť a ostávajúcu tretiu dopočítať.

Pri použití akéhokoľvek elektrolytu musíme počítať s tým, že elektrolytom začne prúd pretekať až po dosiahnutí určitého rozkladného napätia. Potom pre napätie na elektrolyte platí vzťah:

$$U_{elektrolyt} = U_{rozkladné} + R_{elektrolyt} \cdot I \quad (5.6)$$

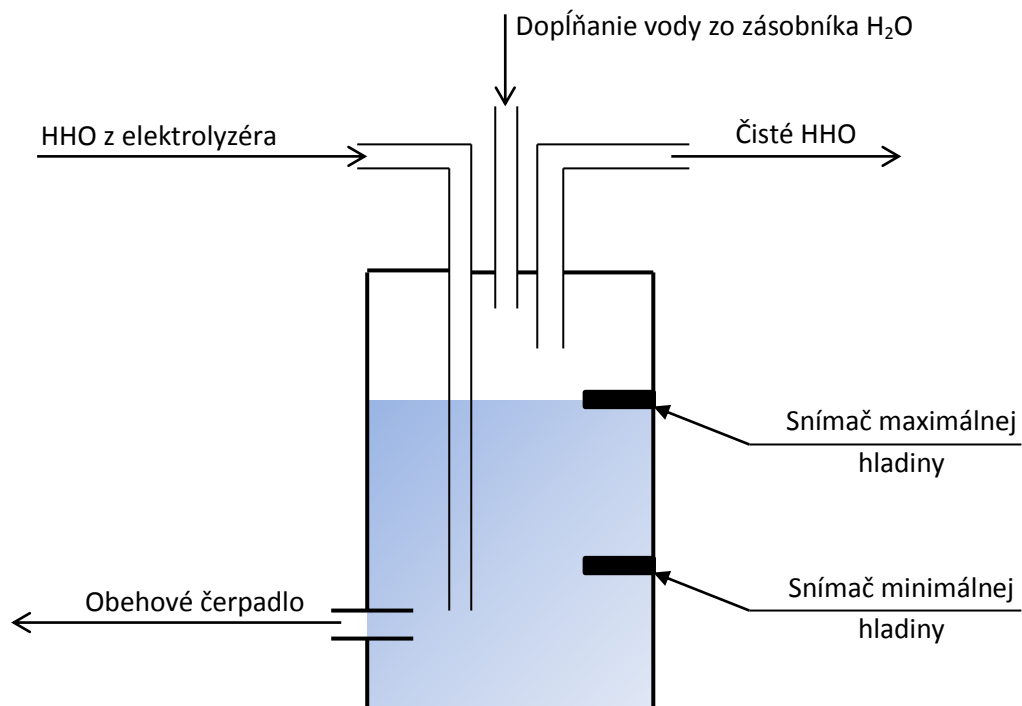
Potom pre celkové napätie na elektrolyzéri platí vzťah:

$$U = U_{rozkladné} + R_{celk.} \cdot I \quad (5.7)$$

5.2 Čistenie zmesi HHO

Zmes plynu HHO vychádzajúceho z elektrolyzéra nie je vhodné prisávať do motora. Je to z toho dôvodu, že zmes môže obsahovať elektrolyt a to v kvapalnej prípadne plynnej forme. Elektrolyzér sa správa ako odpor a pri prechode prúdu sa zahrieva, čo spôsobuje odparovanie H_2O .

Konštrukčne sa jedná o valcovú nádobu, ktorá je do určitého objemu naplnená elektrolytom. Do nádoby vedie vstup z elektrolyzéra. Vstup ústi až pod hladinou elektrolytu, teda zmes HHO vstupujúca z elektrolyzéra do čističky musí prebublať cez elektrolyt nachádzajúci sa vo valcovej nádobe. Vyčistená zmes HHO sa hromadí nad hladinou elektrolytu a odvádza sa výpustným ventilom. Vstup do čistiacej nádoby musí ústiť pod minimálnou hladinou elektrolytu. Je to z dôvodu, aby aj pri minimálnej hladine elektrolytu dochádzalo k prebublávaniu a čisteniu plynu.



Obr. 5.3 Nákras čistenia HHO

Nádoba na čistenie má viacero funkcií využitia. Jednou z nich je zásobáreň elektrolytu pre elektrolyzér. Elektrolyt je v podstate zmiešaná destilovaná voda s KOH o určitej koncentrácii. Rozkladom vody v elektrolyzéri dochádza k úbytku objemu vody a tým pádom aj k úbytku elektrolytu. KOH sa však nerozkladá a ani na nič neviaže, takže je potrebné dopĺňovať len destilovanú vodu. Voda sa dopĺňa zo zásobníka H_2O

vstupným ventilom. Proces funguje automaticky. Keď hladina klesne pod úroveň snímača hladiny, dôjde k otvoreniu ventilu a ten doplní destilovanú vodu do požadovaného množstva. Snímač minimálnej hladiny je umiestnený nad otvorom ústiacej do obehového čerpadla, aby v prípade stavu, kedy bude hladina minimálna, nedochádzalo k nasávaniu vzduchu do čerpadla. A aby bol prívod od elektrolyzéra stále pod hladinou. Maximálne požadované množstvo vody v elektrolyzéri je kontrolované snímačom maximálnej hladiny elektrolytu. Koncentrácia elektrolytu má vplyv na celkový prúd pretekajúci elektrolyzér a teda aj na výrobu zmesi plynu. Koncentrácia KOH by sa mala pohybovať od 15% do 25%. To znamená, že snímače musia byť od seba vzdialené tak, aby pri minimálnej hladine vody nebola koncentrácia väčšia ako 25% a naopak pri maximálnej hladine menšia ako 15%.

V dolnej časti nádoby na čistenie sa nachádza otvor ústiacy do obehového čerpadla. To zabezpečuje obeh elektrolytu v sústave elektrolyzér – čistič HHO. Obeh elektrolytu je dôležitý z viacerých dôvodov. Pri obehu dochádza k chladeniu elektrolyzéra, to je dôležité aby nedochádzalo k jeho prehrievaniu a neznižovala sa tak jeho účinnosť.

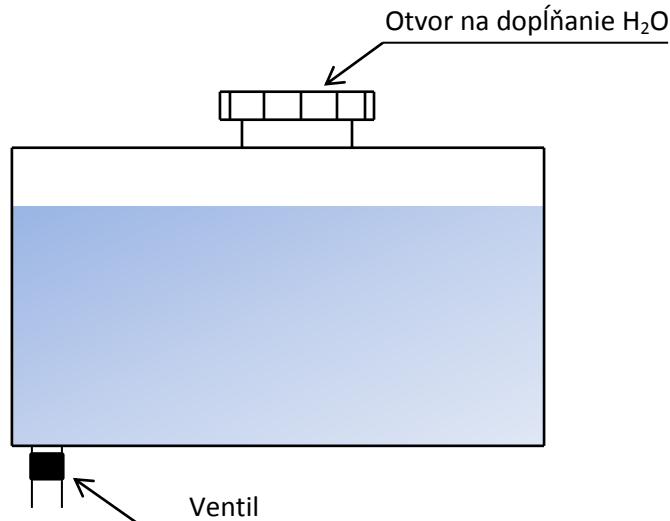
Ďalší dôvod je ten, že pri rozklade vody dochádza k tvorbe plynu v elektrolyzéri, ktorý je potrebné dostať von, aby boli elektródy zaplavené čo najviac. Zároveň sa tým vytlačí vytvorený plyn von z elektrolyzéra.

5.3 Zásobník H₂O

Pri výrobe vodíka a kyslíka z vody dochádza v podstate k premene vody na dané plyny. Z toho vyplýva, že objem vody v elektrolyzéri sa postupne znižuje. Preto pre správne fungovanie treba vodu dopĺňať. Objem vody v samotnom elektrolyzéri a v nádobe na čistenie HHO je malý, došlo by k jeho rýchlemu úbytku a tak by bolo treba dopĺňať vodu často. Z toho dôvodu je potrebné mať zásobník vody, z ktorého by sa automaticky dopĺňovala voda do systému. Týmto spôsobom sa predĺži servisný interval dopĺňovania vody. Dĺžka intervalu dopĺňovania vody závisí od veľkosti zásobníka a priemernej spotreby HHO.

Samotný zásobník je veľmi jednoduchý. Jedná sa o plastovú nádobu s otvorom na dopĺňanie vody. V spodnej časti nádoby sa nachádza ventil, ktorý je ovládaný snímačom hladiny z nádoby na čistenie HHO.

Je veľmi dôležité, aby sa do zásobníka, ale aj do celého systému používala len destilovaná voda. Neobsahuje totiž žiadne prímеси, ktoré by mohli spôsobovať zanesenie HHO generátora, usádzanie vodného kameňa v systéme a nežiaducej reakcii a následnému vylučovaniu plynov, ktoré by mohli byť škodlivé.



Obr. 5.4 Nákres zásobníka H₂O

Spotreba vody v systéme sa dá vypočítať jednoduchým vzorcom, pokiaľ poznáme množstvo zmesi HHO, ktorú generátor vyrobí. Pri výpočte spotreby vody vychádzame z poznatku, že pri elektrolýze sa vylučuje vodík a kyslík v nasledujúcom pomere:

$$\frac{V_H}{V_O} = \frac{2}{1} \quad (5.8)$$

Z pomeru vidíme, že kyslíku sa vytvorí dvojnásobné množstvo, teda z vytvoreného množstva zmesi tvorí kyslík 2/3 objemu. Z toho pre hmotnosť vylúčeného kyslíka platí:

$$m_O = \frac{2 \cdot \delta_O \cdot V_p}{3} \quad (5.9)$$

A pre vodík ktorý tvorí 1/3 objemu platí:

$$m_H = \frac{\delta_H \cdot V_p}{3} \quad (5.10)$$

Keďže hmotnosti musia byť zachované, hmotnosť vody je rovná hmotnostiam vylúčených plynov:

$$m_{H_2O} = \frac{2 \cdot \delta_O \cdot V_p}{3} + \frac{\delta_O \cdot V_p}{3} \quad (5.11)$$

Po úprave:

$$m_{H_2O} = \frac{1}{3} \cdot V_p \cdot (\delta_H + 2 \cdot \delta_O) \quad (5.12)$$

Kde

- V_p – objem vyprodukovaného plynu HHO, zadaného v m³ prípadne m³/h pokiaľ chceme určiť ako rýchlo sa spotrebováva voda zo zásobníka.

Pri produkcii 5l/min HHO, čo je v podstate 0,3 m³/hod bude spotreba vody nasledujúca:

$$m_{H_2O} = \frac{1}{3} 0.3 \cdot (1.409 + 2 \cdot 0.08895) = 0.1587 \text{ kg} \quad (5.13)$$

Pri hustote vody ktorá je rovná približne $\rho_{H_2O} = 1 \text{ kg/m}^3$ môžeme teda povedať, že pri produkcii 0,3 m³/hod HHO bude spotreba vody v systéme 0.1587 litra za hodinu. To znamená, že pri veľkosti zásobníka vody 5litrov, vydrží daný objem pri plnom zaťažení generátora približne 31,5 hodín jazdy. Čo v závislosti na priemernej rýchlosti môže byť až 3000 km.

Samozrejme v dnešnej dobe je trend zjednodušovania vecí. A aj proces dopĺňania vody by sa dal istým spôsobom takzvané automatizovať. Jednalo by sa o doplnenie systému prístrojom, ktorý by bol schopný získavať vodu zo vzdušnej vlhkosti. Tú by následne odviezol do zásobníka vody. Systémy na zrážanie vody sú v dnešnej dobe k dispozícii a používajú sa napríklad v domácnostiach, kde je nežiaduca nadmerná vlhkosť. I keď tento systém by značne uľahčil obsluhu celého generátora, došlo by k predraženiu celého systému a dalo by sa o ňom uvažovať iba za podmienok, že by bol k dispozícii systém na odvádzanie vzdušnej vlhkosti potrebného výkonu za nízke prevádzkové náklady. Taktiež pri použití tohto systému je tu otázka, či by sa zo vzduchu spolu s vodou nedostávali do systému aj nečistoty, ktoré by mohli spôsobovať poškodenie elektrolyzéra. Muselo by tak dôjsť k dodatočnému čisteniu vody, čo by celý systém len skomplikovalo. Z týchto dôvodov je jednoduchšie a lepšie za momentálneho stavu použiť systém ručného dopĺňania destilovanej vody.

5.4 Zásobník HHO zmesi

Zmes plynu vyrobená v elektrolyzéri a následne prečistená nebude putovať rovno do motora. Najprv ňou bude plnený malý zásobník a až zo zásobníka bude viesť do nasávania motora. Zásobník je v tvare jednoduchej valcovej nádoby. Na jednej strane bude vstupný otvor pre vedenie zmesi HHO z elektrolyzéra, konkrétne z nádoby na čistenie a na druhej strane bude výpustný otvor vedúci k ventilu, ktorý bude riadiť dávkovanie zmesi do prívodu vzduchu do motora. Tento zásobník by mal byť po vypnutí zariadenia odvetraný, tak, aby zmes HHO neostávala skladovaná.

6 Meranie účinnosti elektrolyzéra

Samotný generátor na výrobu vodíka je v tejto fáze hotový a schopný vyrábať zmes plynov po zapojení k zdroju elektrickej energie. Jediná vec, čo chýba je riadiaca elektronika schopná riadiť výkonnosť generátora. Avšak aj bez riadiacej elektroniky

môžeme otestovať účinnosť elektrolyzéra a zistiť tak ako sa odlišuje matematický výpočet množstva vyprodukovanej zmesi plynov od skutočnej hodnoty nami nameraných údajov.

Účinnosť nie je len orientačný údaj o kvalite zostavenia elektrolyzéra, ale je to potrebný údaj pri zostavovaní riadenia. Teda aby sme vedeli aká je odchýlka medzi vypočítanými hodnotami a skutočnými. Produkciu budeme merať za rôznych podmienok a pozorovať jednotlivé účinnosti. Pričom najdôležitejšie body merania sú nasledovné:

- Stav tesne po zapnutí elektrolyzéra, kedy má elektrolyzér teplotu okolia približne 20°C
- Stav ktorý nastane krátku dobu po spustení elektrolyzéra
- Stav po ustálení veličín, keď sa ustáli teplota elektrolyzéra na určitej hodnote a produkcia plynov bude tiež ustálená.

Pri našom meraní budeme musieť zaznamenávať potrebné veličiny k výpočtom:

- $U_{\text{el.}}$ – napätie na elektrolýze
- $I_{\text{el.}}$ – prúd prechádzajúci elektrolýzou
- $T_{\text{el.}}$ – teplota elektrolyzéra
- $T_{\text{amb.}}$ – teplota okolia
- T_{HHO} – teplota zmesi HHO
- $P_{\text{amb.}}$ – atmosférický tlak
- V_{HHO} – objem vyprodukovanej zmesi HHO
- $R_{\text{el.}}$ – odpor elektrolyzéra (meraný cez celú sústavu článkov)

Po nameraní vyššie uvedených hodnôt za rôznych stavov vypočítame potrebné údaje:

- V'_{HHO} – vypočítaná (teoretická) hodnota objemu vyprodukovanej zmesi HHO
- $\Delta R_{\text{el.}}$ – zmena odporu elektrolýzy voči počiatočnej hodnote
- $\Delta T_{\text{el.}}$ – zmena teploty elektrolýzy voči počiatočnej hodnote
- Účinnosť – pomer nameranej hodnoty k teoretickej vypočítanej hodnote

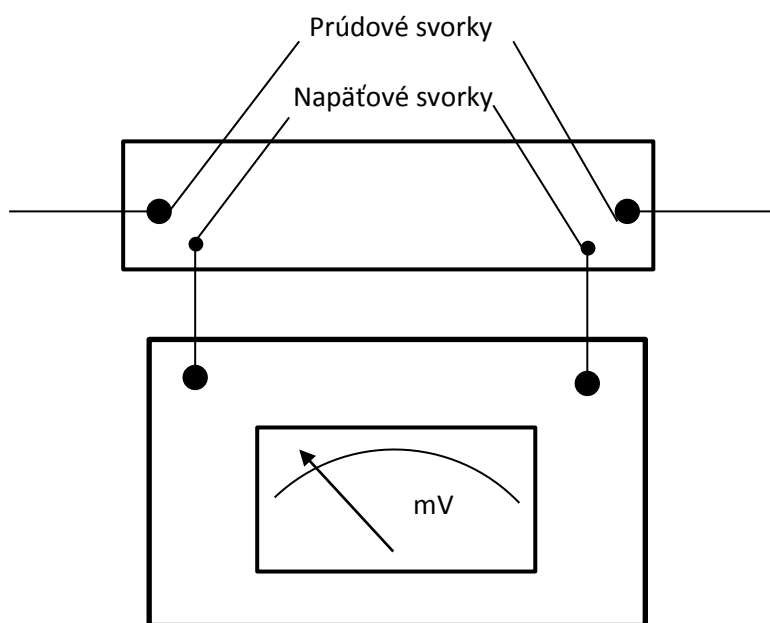
Samozrejme pri meraní je dôležitá hodnota koncentrácie KOH.

6.1 Zostavenie systému na meranie účinnosti

Pri samotnom meraní je dôležitá schéma merania, ktorá nám ukazuje ako bude systém zapojený pri meraní potrebných parametrov. Schéma ukazuje taktiež zapojenie jednotlivých meracích prístrojov. Systém bude obsahovať viacero typov snímačov, ktoré budú pri meraní vyhodnocovať jednotlivé potrebné veličiny v čase. Pre samotné meranie sú potrebné nasledujúce snímače:

- Snímač napětí
- Snímač proudu
- Snímač teploty prostředí
- Snímač teploty elektrolyzára
- Snímač atmosferického tlaku
- Meracie zariadenie prietoku plynu

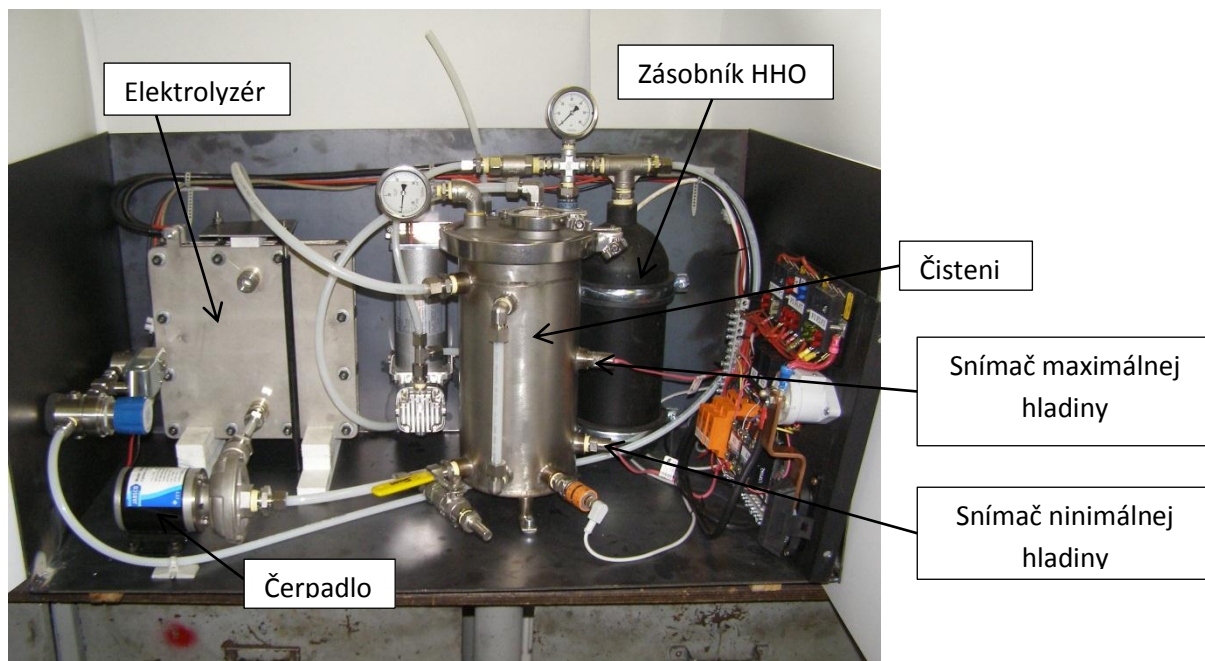
Meranie prúdu sa v našom prípade bude realizovať jednoduchým spôsobom za použitia bočníka.



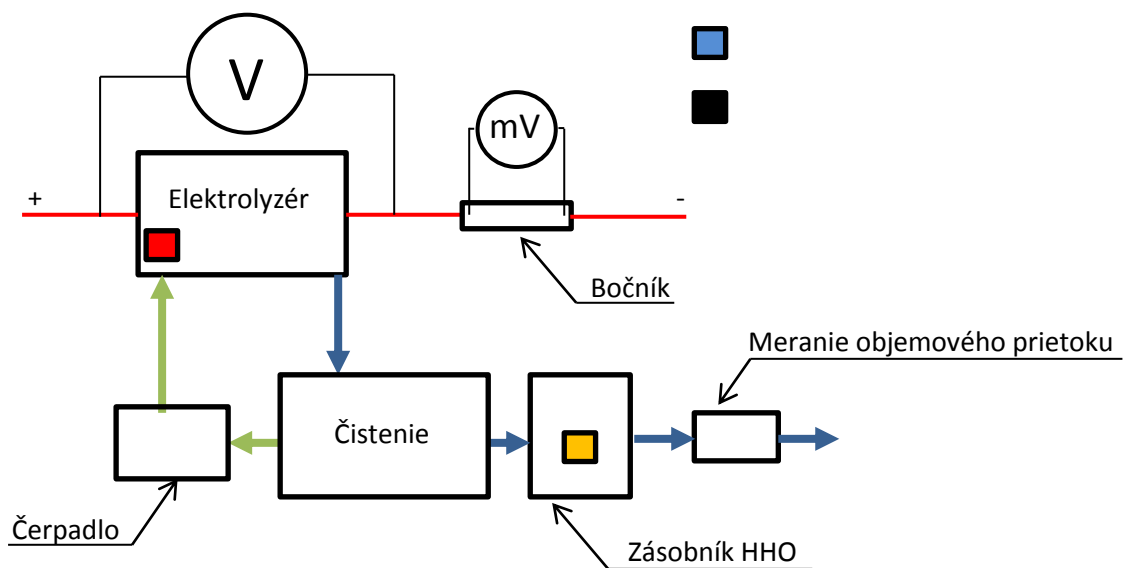
Obr. 6.1 Zapojenie bočníka pre meranie veľkých prúdov

Na svorkách bočníka budeme teda merať napätie a zo znalosti jeho odporu a nameraného napätia vypočítame hodnotu prúdu prechádzajúceho obvodom.

Na meranie objemového prietoku vyprodukovanej zmesi plynov použijeme merací prístroj, ktorý funguje na princípe uzavretej guľičky vo valcovej nádobe. Plyn prúdiaci zo spodu valcovej nádoby tlačí na guľičku silou a tá zas naopak svojou gravitačnou tiažou tlačí v opačnom smere dole. V polohe kde sa obe sily vyrovnajú, ukáže guľička na stupnici hodnotu rýchlosti prúdiaceho plynu v litroch za minútu.



Obr. 6.2 Obrázok testovacieho HHO generátora



Legenda:

- Čidlo teploty elektrolyzéru
- Čidlo teploty zmesi HHO
- Čidlo teploty okolia
- Meranie atmosferického tlaku

Obr. 6.3 Schéma zapojenia meracích prístrojov

Naobrázku vidíme rozmiestnenie a zapojenie meracích prístrojov a senzorov. Dané senzory a prístroje zaznamenávajú zmenu meraných veličín v čase, aby sme mohli vyhotoviť grafické znázornenie. Senzor teploty okolia ako aj senzor atmosferického tlaku nemusí zaznamenávať teplotu stále. Predpokladáme, že počas merania nedôjde k výraznejšej zmene teploty okolia a atmosferického tlaku.

6.2 Získané data z merania

Z nameraných dát musíme následne vypočítať potrebné veličiny. Teoretickú alebo vypočítanú hodnotu objemu zmesi plynov vypočítame za použitia vzorca (4.21). Do tohto vzorca dosadíme hodnoty prúdu prechádzajúceho cez elektrolyzér, hodnotu teploty zmesi plynov a atmosferického tlaku. Teda vzorec bude vyzerat' nasledovne:

$$V'_{HHO} = \frac{\frac{M_{mH} \cdot I_{el} \cdot \Delta t}{F \cdot v_H}}{\left(\frac{\rho_H}{\gamma \cdot T_{HHO}}\right) \cdot \left(\frac{p_{amb.}}{p_0}\right)} + \frac{\frac{M_{mO} \cdot I_{el} \cdot \Delta t}{F \cdot v_O}}{\left(\frac{\rho_O}{\gamma \cdot T_{HHO}}\right) \cdot \left(\frac{p_{amb.}}{p_0}\right)} \quad (6.1)$$

Dôležitým faktorom pre nás je účinnosť elektrolyzéra. Tá je pre náš prípad definovaná ako pomer nameraného objemového množstva k teoretickému, vypočítanému objemovému množstvu.

$$ucinnost = \frac{V_{HHO}}{V'_{HHO}} \cdot 100 [\%] \quad (6.2)$$

Celé meranie prebehlo na skúšobnom elektrolyzéri o menšej výkonnosti. Použitá bola koncentrácia KOH 20%.

Tlak plynu pri meraní jeho objemového prietoku bol počas celého merania konštantný a jeho hodnota bola následovna:

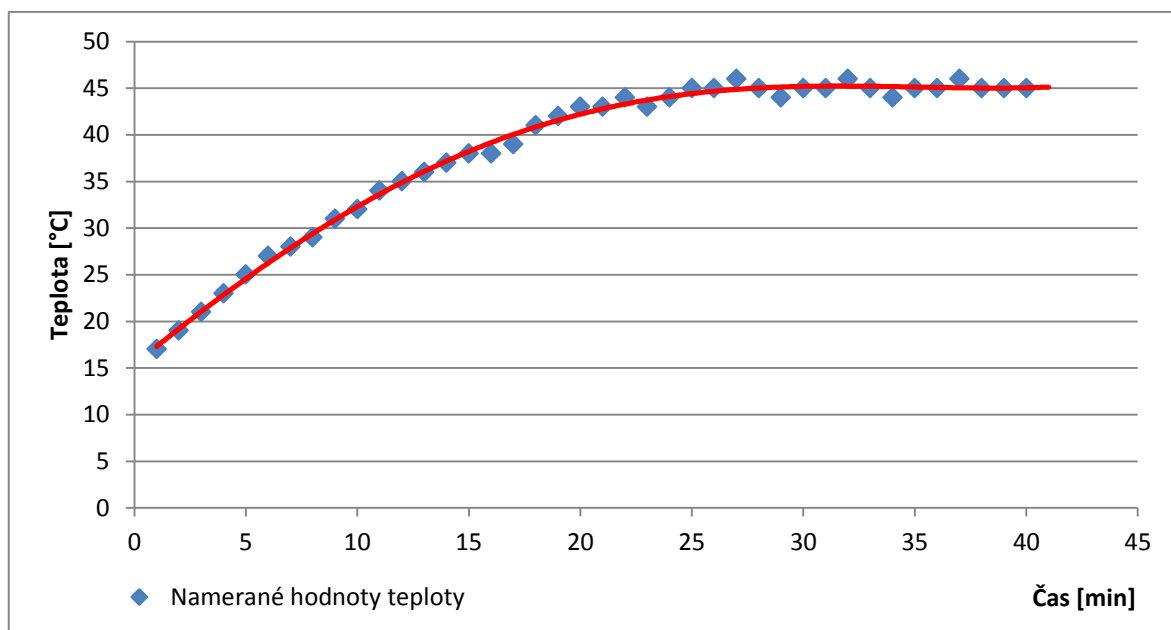
$$p_{amb.} = 101,900 \text{ kPa}$$

Teplota taktiež výrazne nekolísala a teda ju môžeme pokladať za konštantnú. Jej hodnota bola:

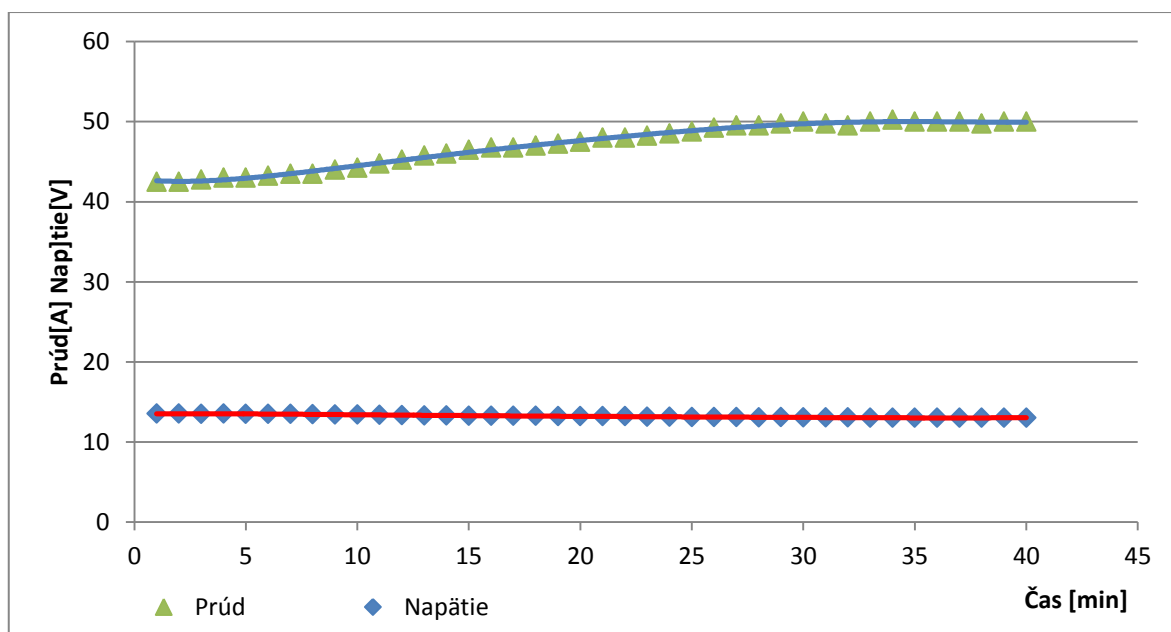
$$t_{HHO} = 25^{\circ}C$$

Teplota okolia bola počas merania konštantná a celý system mal na začiatku teplotu okolia. Hodnota teploty okolia bola:

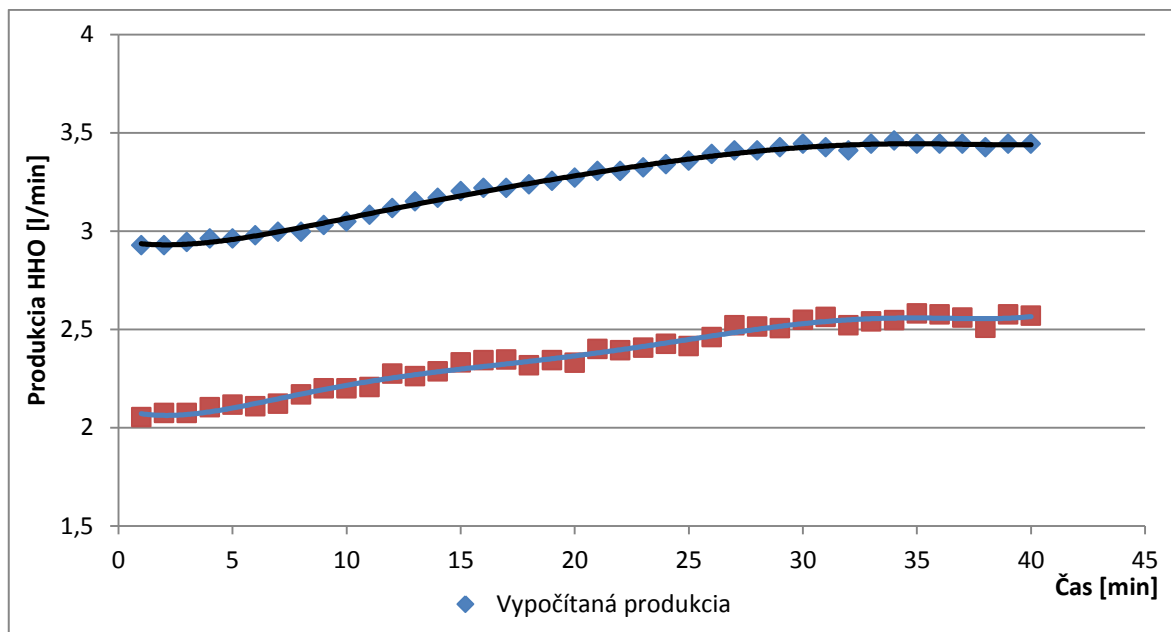
$$t_{HHO} = 17^{\circ}C$$



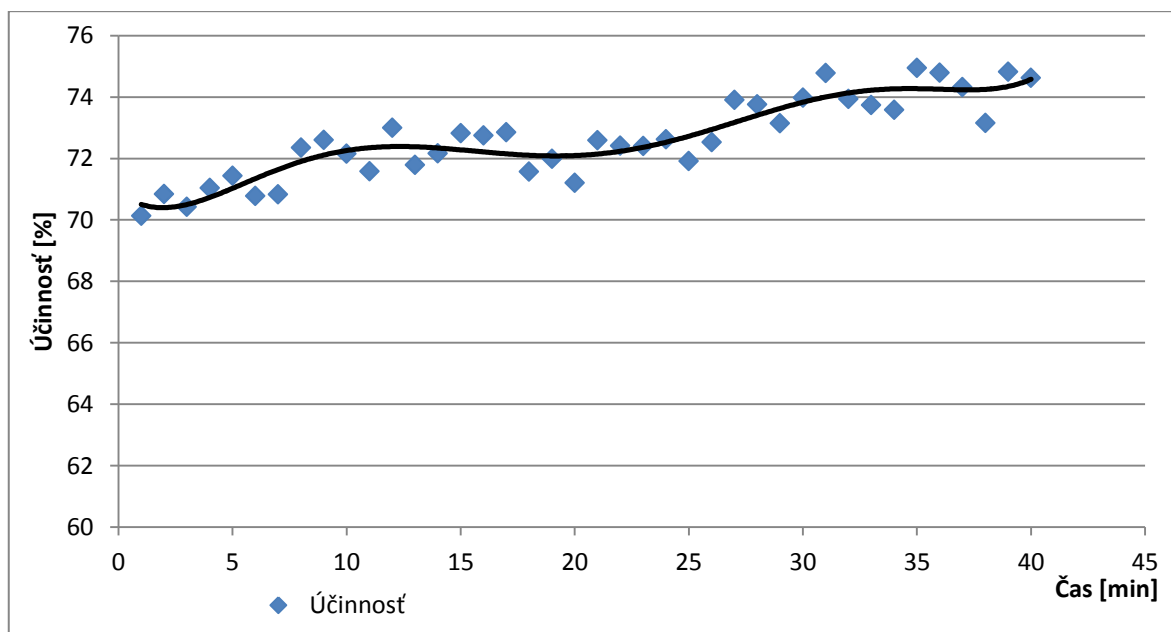
Graf 6.1 Teplotné charakteristiky elektrolyzéra v čase



Graf 6.2 Závislosť prúdu a napätia na čase



Graf 6.3 Vypočítaná a nameraná produkcia zmesi HHO



Graf 6.4 Graf účinnosti elektrolyzéra

Z nameraných dát vidno, že teplota elektrolyzéra stúpla z teploty 17°C na teplotu približne 45°C. Na zohrievanie má vplyv prúd prechádzajúci elektrolyzérom. Keďže nebolo možné merať teplotu vo vnútri zariadenia, môžeme len predpokladať, že teplota elektrolytu a vnútra zariadenia bola po ustálení väčšia ako teplota plášťa.

$$\Delta T_{el.} = 28^{\circ}\text{C}$$

Teplota elektrolyzéra má vplyv na odpor elektrolyzéra. Odpor elektrolytu s rastúcou teplotou klesá, čo môžeme pozorovať aj v našom prípade. Na začiatku merania bol odpor

celého elektrolyzéra rovný $0,318 \Omega$. Po ustálení teploty bol odpor na hodnote $0,260 \Omega$. Zmena teploty je teda:

$$\Delta R_{el.} = -0,058 \Omega$$

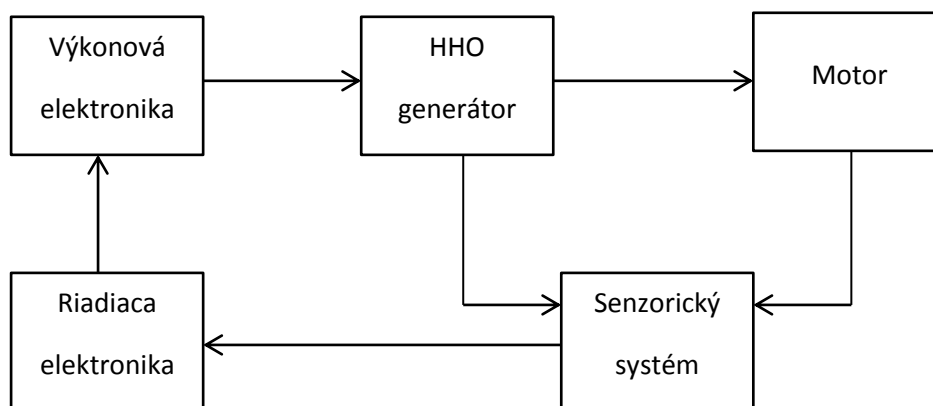
Zmena odporu elektrolyzéra mala vplyv aj na zmenu prúdu pretekajúceho cez elektrolyzér. Prúd vzrástol z pôvodných $42,5 \text{ A}$ na hodnotu 50 A . So zvyšujúcim sa prúdom vzrástol aj výkon elektrolyzéra a to z počiatočných $2,1 \text{ l/min}$ na $2,51 \text{ l/min}$.

Účinnosť elektrolyzéra sa počas merania pohybovala od 70% do 75% . Na jej hodnotu malo vplyv viacero faktorov ako napríklad teplota elektrolyzéra, prúd prechádzajúci elektrolyzérom ale aj meniac sa koncentrácia elektrolytu. Účinnosť elektrolyzéra býva od udávaná od 50% do 94% . Teda v našom prípade sa pohybujeme približne v strede rozsahu. Účinnosť by sa samozrejme môhla zvýšiť kvalitnejším chladením elektrolyzéra a zmenou povrchovej úpravy elektród, ich zdrsnením sa dosiahne väčšia plocha.

7 Riadiaca elektronika

Riadiaca elektronika v tomto prípade bude mať na starosti dodávku optimálneho množstva zmesi HHO do motora. Pričom celé riadenie môžeme rozdeliť na tri celky:

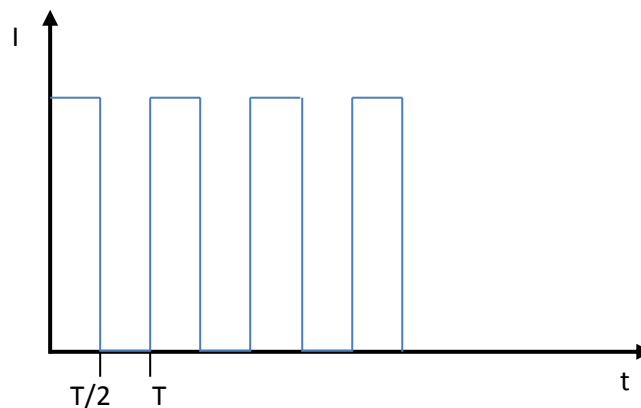
- **Výkonová elektronika** – časť obvodu, ktorá bude spínať veľké prúdy, jedná sa hlavne o polovodičové súčiastky
- **Senzorický systém** – systém, ktorý ma na starosti zber dát a informácií z automobilu a z HHO generátora
- **Riadiaca elektronika** – časť elektroniky, ktorá má na starosti vyhodnocovanie údajov zo senzorického systému a následné riadenie výkonovej elektroniky



Obr. 7.1 Schéma riadiace elektroniky

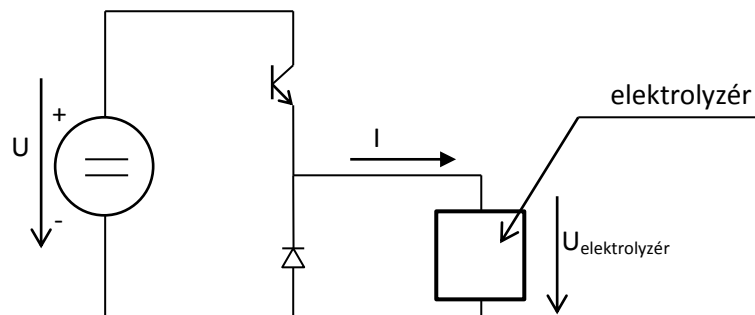
7.1 Výkonová elektronika

Pri návrhu výkonovej elektroniky je dôležité uvedomiť si v prvom rade ako budeme elektrolyzér riadiť. Z predchádzajúcich kapitol vieme, že množstvo vyprodukovanej zmesi plynov závisí od veľkosti prúdu prechádzajúceho cez elektrolyzér za určitý čas. Z toho vyplýva, že zmenu výkonnosti elektrolyzéra môžeme realizovať pomocou zmeny veľkosti prúdu alebo zmenou času, za ktorý pôsobí prúd na elektrolyzér. Teda v druhom prípade ide o takzvané pulzné riadenie. Jednoducho povedané, pokiaľ máme časový úsek t a prúd I , ktorý nám na elektrolyzér pôsobí počas času $t/2$, elektrolyzér vyprodukuje za čas t len polovičné množstvo zmesi. Zmenšovaním času pôsobenia prúdu počas periódy t môžeme riadiť výkonnosť elektrolyzéra v podstate od nulového výkonu až po plný stopercentný výkon.



Obr. 7.2 Graf znázorňujúci 50% výkon

Samotná výkonová elektronika bude veľmi jednoduchá. Jedná sa o tranzistorový spínač zapojený ako menič pracujúci v I. kvadrante. Ide o typ STEP-DOWN, ktorý znižuje napätie.



Obr. 7.3 Menič pracujúci v I. kvadrante, STEP-DOWN

Pri zostavovaní výkonovej elektroniky je dôležité vhodne zvoliť parametre polovodičových súčiastok. Keďže obvodom preteká veľký prúd, musia byť súčiastky dimenzované na jeho veľkosť. Je vhodné namiesto tranzistora použiť príslušný optočlen a tak galvanicky oddeliť výkonovú a riadiacu elektroniku. Taktiež je vhodné do obvodu zakomponovať poistku, ktorá v prípade presiahnutia určitej hodnoty prúdu preruší obvod a zabráni tak poškodeniu jednotlivých súčiastok.

7.2 Snímané veličiny

Pre presnejšie riadenie elektrolyzéra treba získavať informácie o jednotlivých veličinách. Cieľom je teda pomocou určitého senzorického systému zistiť čo najpresnejšiu aktuálnu hodnotu výkonu elektrolyzéra. Pre nás je ako výkon uvažovaná objemová, alebo hmotnostná produkcia zmesi plynov. Produkcia sa dá zistiť dvomi spôsobmi. Jeden zo spôsobov je priame meranie pomocou snímača prietoku. Samozrejme spôsobov merania prietoku plynu je veľa. Väčšina zo spôsobov potrebuje kompenzáciu na tlak, teplotu a sú závislé na vlastnostiach meraného média. Pri použití takýchto snímačov treba následne urobiť korekciu, aby bola meraná hodnota správna.

Ako vhodný prietokomer na náš účel je termický prietokomer PROLINE T-MASS. Jedná sa o hmotnostný prietokomer, teda na jeho výstupe je udávaný prietok daného plynu v kg/h. Teda ide o jednotku, ktorá sa nemení so zmenou tlaku a teploty, čo je pre nás veľmi výhodné z hľadiska ďalšieho použitia. Ďalšou výhodou tohto snímača je, že sa dá nastaviť na rôzne druhy plynov a dokonca aj na zmes plynov až s ôsmimi komponentmi. Snímač má na výstupe hodnotu prietoku plynu a zároveň aj teplotu meraného média, teda v našom prípade zmesi HHO. Komunikácia so snímačom prebieha pomocou zberníc HART, PROFIBUS DP alebo MODBUS RS485.



Obr. 7.4 Termický prietokomer PROLINE T-MASS (prevzaté z [4])

„Základným princípom je sledovanie ochladzovacieho efektu pretekajúceho plynu na dvoch termických snímačoch. Plyn, pretekajúci meracím úsekom, pôsobí na termické snímače, kde jedna funguje ako klasický teplomer a druhá je vo funkcii vyhrievača. Elektronika vyhodnocuje aktuálnu teplotu plynu a zároveň sa snaží udržiavať rovnakú teplotnú diferenciu medzi snímačmi. Čím je väčší hmotnostný prietok plynu, tým je výraznejší ochladzovací efekt a tým väčší prúd je potrebný na vyhriatie jedného snímača teploty, bežne Pt100. Meraný prúd je priamo úmerný hmotnostnému prietoku.“[4]

Pri použití tohto prietokomeru, by ho bolo vhodné zabudovať na potrubie medzi nádobu na čistenie zmesi a zásobník zmesi HHO. Avšak nie je to jediný spôsob ako sa dá zistiť prietok. Ten je možné získať aj za pomoci výpočtu. Takto získaná hodnota nebude presná. Pre výpočet potrebujeme poznať hlavne prúd prechádzajúci elektrolyzér. Z neho teda vypočítame prietok a za pomoci teploty a tlaku plynu upravíme túto hodnotu do presnejšieho tvaru. Táto hodnota i tak nebude dostačujúca pretože elektrolyzér pracuje s určitou účinnosťou, ktorú je dobré do výpočtu zahrnúť. Účinnosť sa môže v priebehu pracovných podmienok meniť a tak treba uvažovať pri výpočte aj s touto zmenou. Dá sa povedať, že výpočet produkcie plynu nám môže slúžiť aj ako model elektrolyzéra, ktorý bude mať na vstupe tri veličiny a na výstupe jednu. Tento model, i keď ho nemôžeme považovať úplne za presný, sa dá použiť v riadení elektrolyzéra.

Pre samotný HHO generátor bude treba teda nasledujúce snímače veličín:

- **Prietokomer** – najlepšie termický, ale nemusí byť, pre jednoduché riadenie sa prietok dá sa približne vypočítať.
- **Čidlo prúdu** – prúd sa dá merať za pomoci rôznych metód, jednoduché a postačujúce meranie pre tento prípad sa dá použiť bočník na ktorom sa meria napätie a za pomoci známeho odporu sa vypočíta prúd prechádzajúci obvodom.
- **Snímač teploty plynu** – najdôležitejšie je zvoliť miesto merania teploty. Keďže získaná teplota má odrážať stav plynu potrebný pre výpočet, je snímač potrebné umiestniť tak, aby meral teplotu čistej zmesi plynov. Toto miesto sa nachádza až za nádobou na čistenie plynu. Preto by snímač teploty mal byť umiestnený v zásobníku plynu. Keďže zásobník je väčších rozmerov a nenastáva problém s namontovaním snímača. Jedná sa teda o meranie teploty vo vnútri uzavretej nádoby. Na takéto merania slúžia špeciálne snímače teploty, ktoré sú vybavené závitom a dajú sa namontovať do otvoru so závitom. Pričom samotné čidlo je umiestnené vo vnútri nádoby a na vonkajšej strane je výstup vo forme vodičov. Rozsah meracieho zariadenia v tomto prípade postačí od 0°C do 100°C.
- **Snímač teploty elektrolyzéra** – tento snímač bude nebude slúžiť na priame riadenie elektrolyzéra. Je však potrebný na monitorovanie teploty. Účinnosť je závislá na teplote a je treba elektrolyzér chladiť, aby neprekročil určitú hodnotu teploty. Problematické je však snímač teploty umiestniť. Keďže elektrolyzér je uzavretý a vo vnútri nie je pracovný priestor na umiestnenie snímača, je treba nájsť náhradné riešenie. Je možné merať teplotu na povrchu elektrolyzéra a pomocou meraní stanoviť, aká má byť povrchová teplota. Druhým spôsobom je využiť

zmenu odporu elektródy v závislosti na teplote. Najlepšie je na to využiť strednú elektródu, keďže sa nachádza v strede zariadenia, dá sa predpokladať, že tu bude najväčšia teplota. Meraním odporu teda získame približnú teplotu v strede elektrolyzéra. Využiť na meranie teploty odpor celého elektrolyzéra vhodné nie je, a to z dôvodu, že koncentrácia kyseliny sa v čase mení a tak kolíše aj odpor.



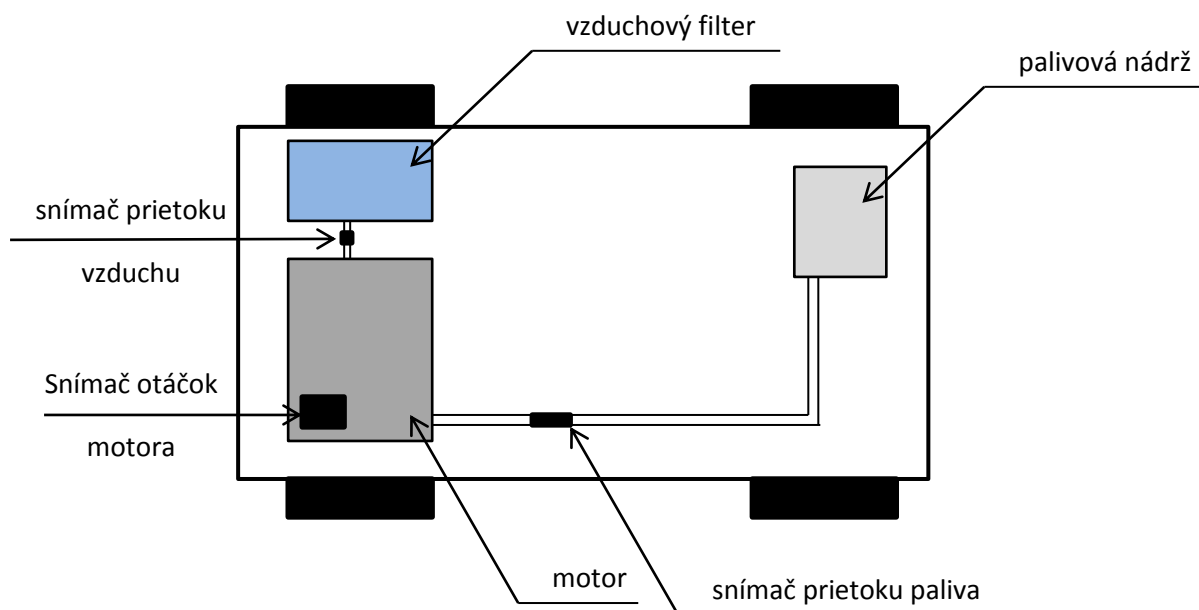
Obr. 7.5 Príklad snímača so závitom, snímač SFR50-SFRK (prevzaté z [5])

Predchádzajúce časť kapitoly popisovala snímače potrebné k získavaniu informácií priamo na HHO generátore. Pre správne riadenie elektrolyzéra je za potrebné poznať niektoré veličiny aj zo zariadenia, s ktorým generátor HHO spolupracuje. Teda veličiny, od ktorých sa bude odvíjať riadenie výkonu. Tento problém je zložitejší a podrobnejšie sa mu venuje kapitola popisujúca spôsoby riadenia HHO generátora. Každopádne autá využívané v dnešnej dobe majú dostatočné informácie o motore už k dispozícii a veľa z týchto údajov sami využívajú na efektívne riadenie automobilu. Z tohto hľadiska by bolo najlepšie využiť už zabudované snímače a použiť informácie o motore, ktoré nám poskytujú. Avšak tu nastáva problém a to ten, že v podstate každý automobil využíva iný systém a nedá sa navrhnuť všeobecné zariadenie na získavanie týchto informácií z automobilu. Informácie, ktoré boli potrebné na riadenie generátora sú:

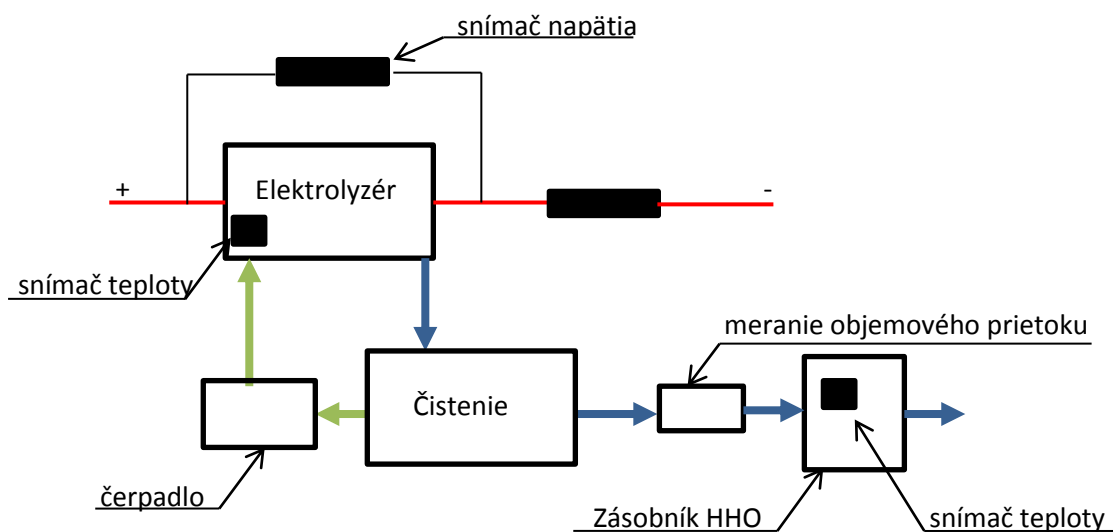
- **Otáčky motora** – snímanie otáčok motora sa dá realizovať dvoma hlavnými spôsobmi. Prvým z nich je snímať otáčky priamo na výstupnej hriadieli motora. Druhým zo spôsobov je snímanie polohy valcov, respektíve stačí jeden valec. Z polohy valcov sa potom dajú vypočítať otáčky motora.
- **Aktuálna spotreba paliva** – v automobile sa o udávaní spotreby paliva stará snímač prietoku paliva. Prietokomer sa pripája na potrubie ktoré vedie palivo z nádrže do motora. Vyrábajú sa snímače, ktoré pracujú na rôznych princípoch a s rôznymi meracími rozsahmi. Je treba zistiť akým snímačom je automobil osadený. Ak by daný snímač nevyhovoval, je treba do systému zabudovať snímač,

ktorý nám bude vyhovovať svojimi vlastnosťami. Pre nás je dôležité, aby snímač dokázal zachytiť prietok od 0 litrov za hodinu.

- **Množstvo vzduchu vstupujúce do motora** – u nových áut je táto hodnota meraná za pomoci váhy vzduchu, ktorá je umiestnená za vzduchovým filtrom. U starších áut sa váha vzduchu nemerala, boli využívané clony, ktoré sa prúdom vzduchu vychyľovali. Neskôr sa používal odporový drôt, pri ktorom sa musela merať aj teplota vzduchu. V dnešnej dobe sa využívajú na meranie prietoku vzduchu v automobiloch ultrazvukové snímače. Tak isto ako pri meraní prietoku paliva, nie je problém do systému domontovať vlastný snímač váhy vzduchu a používať údaje na riadenie z neho.



Obr. 7.6 rozmiestnenie snímačov v automobile

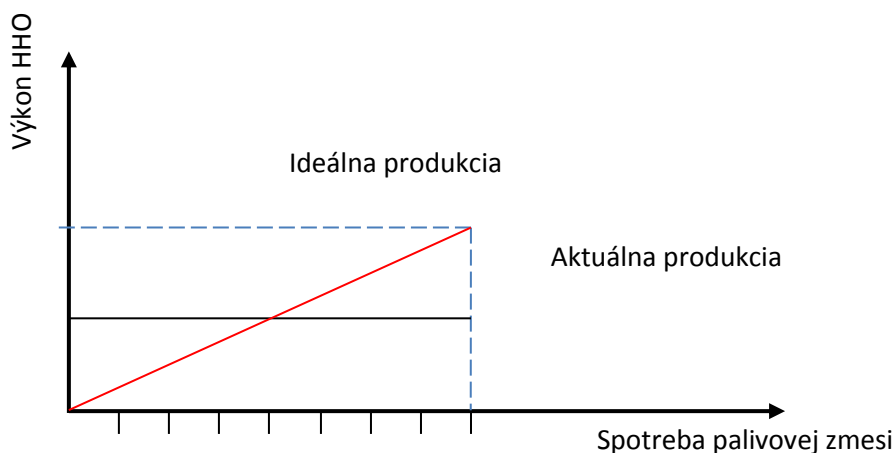


Obr. 7.7 rozmiestnenie snímačov v HHO generátore

7.3 Spôsob riadenia produkcie HHO

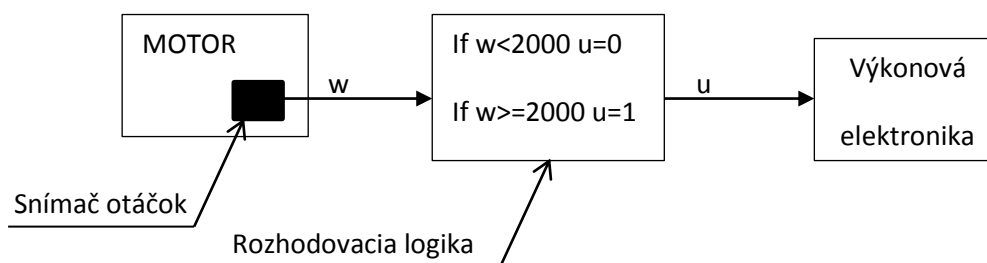
Spôsobov ako riadiť výkon samotného elektrolyzéra je viac. Je na nás, ktorý spôsob zvolíme ako najvhodnejší pre danú aplikáciu. Ide nám o to, aby bol všetok vygenerovaný plyn čo najskôr spotrebovaný. Teda riadenie musí byť prispôsobené spotrebe paliva v motore. Logicky z toho vyplýva, že čím viac paliva bude motor spotrebovať, tým viac zmesi plynu musí HHO generátor produkovať a naopak. Každý spôsob riadenia vyžaduje iné vstupné informácie do riadiacej elektroniky, teda aj použitie rôznych snímačov. Čím zložitejšie riadenie je použité, tým je cena celého systému vyššia. Pri navrhovaní je teda treba dbať aj na konečnú cenu v závislosti na zákazníkovi. Treba mu dať možnosti s návrhom riadenia a poradiť, ktorá aplikácia by bola pre neho vzhľadom na využívanie generátora a spôsobu jazdy najvhodnejšia.

Jedným zo spôsobov je nastaviť maximálnu produkciu tak, aby motor bol schopný spotrebovať väčšinu zmesi HHO ihneď. Alebo tak, že aj pri zníženej spotrebe motora sa vytvorené množstvo vodíka a kyslíka spotrebuje hneď po zvýšení výkonu motora. Pri tomto spôsobe nie je potrebné žiadne riadenie, ide len o správne navrhnutý HHO generátor, ktorý bude v podstate produkovať konštantné množstvo zmesi. Odpadajú teda akékoľvek snímače a riadiaca elektronika. Problém však nastáva v dvoch prípadoch. Prvá oblasť je pri nízkych otáčkach, alebo pri voľnobežných otáčkach motora, kedy je spotreba paliva minimálna. Vzniká tak prebytok zmesi HHO, čo môže spôsobovať nadmerné množstvo zmesi v zásobníku a tým aj vyššie riziko. To sa však dá zamedziť použitím tlakového spínača, ktorý pri určitom tlaku vypne elektrolyzér. Ďalší problém nastáva pri vysokej spotrebe paliva, kedy sa nevyrába dostatok zmesi HHO a teda celý systém má slabú účinnosť. Tento systém sa využíva u väčšiny HHO generátorov, ktoré sa dajú zakúpiť v dnešnej dobe na internete. Tento spôsob však nie je vhodný a dobre funguje len v určitom pásme spotreby motora. Navyše tento spôsob zatťažuje v nízkych spotrebách viac alternátor, pretože si berie konštantný prúd po celú dobu činnosti. Taktiež pri absencii snímačov v podstate nie je možné udržať konštantný výkon generátora. Keďže koncentrácia elektrolytu sa v čase mení a tým sa mení aj prúd prechádzajúci cez elektrolyzér.



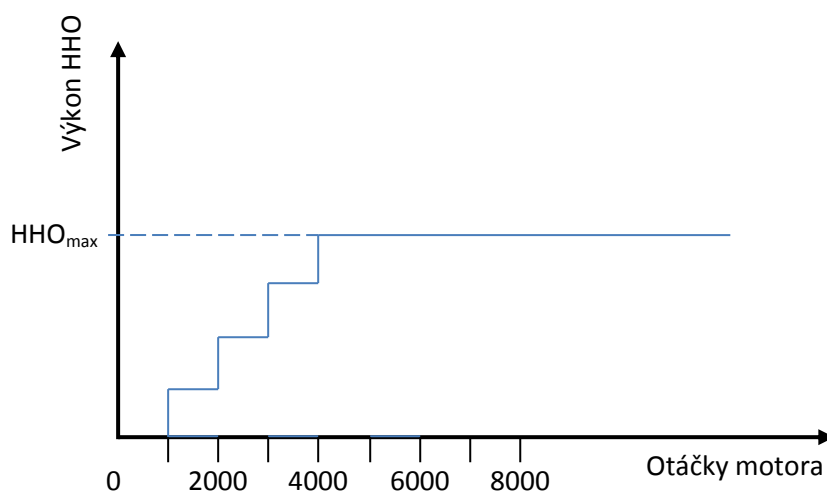
Graf. 7.1 Graf znázorňujúci ideálnu produkciu zmesi HHO a skutočnú produkciu HHO

Druhým zo spôsobov je spôsob, ktorý nevyužíva riadiacu elektroniku a ani snímače. Elektrolyzátor ide na plný nami nastavený výkon, ale len pri určitých otáčkach motora. Teda môžeme povedať, že celý systém funguje len v určitom rozsahu. Dá sa využiť napríklad pri jazde po diaľnici, kedy sú spotreba a otáčky motora konštantné alebo sa pohybujú len v malom rozmedzí. Samozrejme toto platí len pokiaľ automobil neustále nezrýchľuje a nespomaľuje. Systém sa teda dá využiť napríklad pri jazde na tempomat. Navrhne sa elektrolyzátor o takom výkone, aby pri konštantnej jazde na tempomat produkoval také množstvo HHO zmesi, ktoré by dostatočne pokryli spotrebu automobilu. Generátor je počas jazdy neaktívny a spúšťa sa až po dosiahnutí určitých otáčok, respektíve sa dá spustiť spolu so zapnutím tempomatu a zas naopak po jeho vypnutí sa vypne aj generátor. Znova však v tomto prípade nastáva problém so zmenou koncentrácie elektrolytu a tým aj zmenou výkonu generátora. To sa však dá napraviť, že sa bude sledovať prúd prechádzajúci cez elektrolyzátor a za pomoci regulátoru prúdu sa bude udržiavať na konštantnej úrovni. Keďže ide o riadenie za pomoci pulzov, dá sa navrhnúť elektrolyzátor, ktorý bude mať potrebný výkon v 80% šírky pulzu. Potom pri poklese výkonu elektrolyzátor sa dá šírka pulzu predĺžiť a tak korigovať výkon na konštantnú hladinu.



Obr. 7.8 Zapojenie HHO generátora so zapínaním pri určitých otáčkach

Navrhovaný systém sa dá ďalej zefektívniť a to za použitia riadiacej elektroniky a nastavenia viacerých pracovných bodov v závislosti na otáčkach. Teda systém by sa nezapínal sa len pri jednej hodnote otáčok, ale mohol by teoreticky fungovať už od nulových otáčok pričom by sa upravoval výkon elektrolyzéra podľa toho, v akej hladine otáčok by sa motor nachádzal. Rozmiestnenie hladín otáčok, ich počet a na tom závislý výkon by sa určoval priamo pre konkrétny motor. Týmto pomerne jednoduchým spôsobom by bol celý systém efektívnejší. Pokryli by sa tým miesta, kde v predchádzajúcom prípade nie je dodávaná žiadna zmes HHO. Celý systém by sa dal navrhnuť tak, aby mal v malých otáčkach nízke nároky na alternátor a pritom motor dostával optimálne množstvo zmesi HHO.



Graf. 7.2 Graf závislosti výkonu HHO generátora na otáčkach

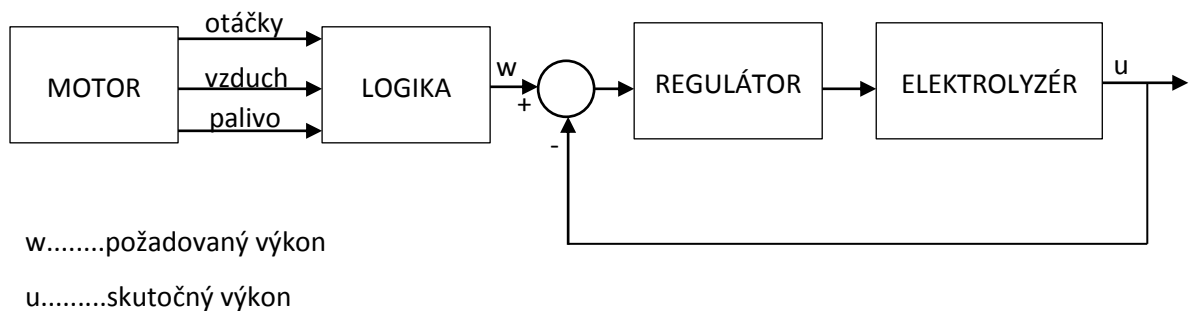
Samozrejme konečným cieľom je riadiť výkon elektrolyzéra tak, aby v každom okamihu dodával optimálne množstvo zmesi HHO. Otázne je, ako definovať optimálne množstvo danej zmesi. Predovšetkým musíme zohľadniť vplyv pridania vodíka a kyslíka do zmesi paliva. Keďže vodík s kyslíkom v danom pomere dva ku jednej je veľmi výbušná zmes a po pridaní k palivu zefektívňuje jeho horenie, musíme predpokladať, že v spaľovacej komore vznikne väčšia teplota. V literatúre sa uvádza teplota v spaľovacom motore pri výbuchu zmesi okolo 2000°C až 2500°C . Horenie kyslíka a vodíka prebieha za teplôt väčších ako 3000°C . Teda rozdiel v teplotách je znateľný a i keď ide o veľmi krátku dobu v dlhšom časovom období môže spôsobiť vyššie teploty v motore. Preto je veľmi potrebné zvážiť množstvo zmesi tak, aby nedochádzalo k nadmernému prehrievaniu motora a následne jeho opotrebovaniu. To aké je optimálne množstvo nie je jednoduché určiť. U každého typu motora je táto hodnota iná a preto je potrebné vyladovať pomer paliva a zmesi HHO priamo pre daný typ motora. Pri ladení treba brať do úvahy teplotu motora a prúdový odber z alternátora pri daných otáčkach a zaťaženi.

Pre takéto riadenie je za potreba viac informácií z motora automobilu. Jedná sa hlavne o aktuálne otáčky motora, aktuálnu spotrebu paliva a o množstvo vzduchu nasávaného do motora. Tieto údaje budú spracovávané za pomoci mikroprocesoru, vyhodnocované a pomocou výstupu z regulátora bude následne riadená výkonová elektronika. Spôsob vyhodnocovania a regulovania výkonu elektrolyzéra bude popísaný v nasledovnej kapitole.

7.4 Optimálne riadenie výkonu

Pri optimálnom riadení výkonu elektrolyzéra máme k dispozícii viacero vstupných údajov, pričom ide o nasledujúce: otáčky motora, objem vzduchu nasávaného do motora, objem paliva vstupujúceho do motora a aktuálny výkon elektrolyzéra meraný v g/min. Z týchto štyroch vstupných veličín nám riadenie vygeneruje jednu výstupnú veličinu. Ide teda o systém MISO, teda multiple input single output. Systém s viacerými vstupmi a jedným výstupom.

Podstatnou časťou je ako z viacerých vstupov vygenerovať jeden. Pre začiatok si môžeme vstupy rozdeliť na dve časti. V prvej časti sa nachádzajú informácie získané z motora automobilu pričom ide o tri vstupy. Ostávajúci jeden vstup nám dáva informácie o aktuálnom výkone elektrolyzéra, teda ide o veličinu ktorú budeme riadiť.



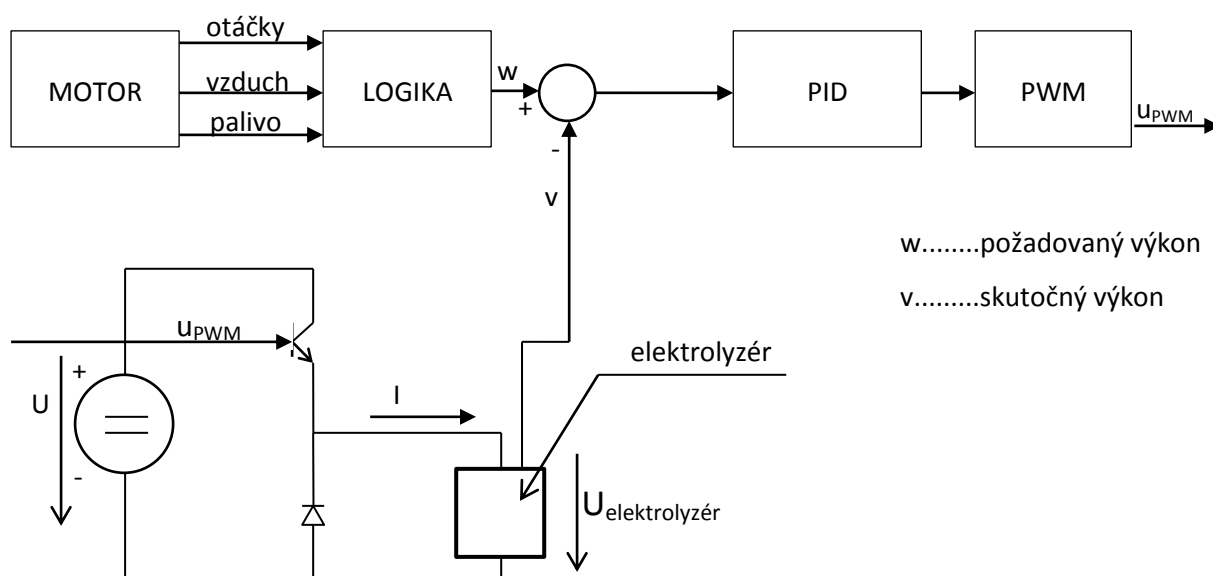
Obr. 7.9 Základná schéma regulovania

Zo základnej schémy na predchádzajúcom obrázku vidíme, že zo získaných informácií z motora automobilu na základe rozhodovacej logiky stanovíme požadovaný výkon elektrolyzéra. Od toho následne odčítame skutočný výkon a zistíme tak regulačnú odchýlku vstupujúcu do regulátora. Pre správne fungovanie musí byť vhodne zvolená rozhodovacia logika, ktorá podľa nami určených pravidiel rozhodne o konečnom výkone elektrolyzéra.

Pri používaní rozhodovacej logiky sú najdôležitejšími činiteľmi množstvo vzduchu a paliva vstupujúceho do motora. Z nich sa určí najprv optimálne množstvo zmesi HHO.

Otáčky motora slúžia hlavne k získavaniu informácií o činnosti alternátora. Keďže pod určitými otáčkami nemôže elektrolyzér pracovať na plný výkon, ale len na čiastočný. Dochádzalo by totiž už k spomínanému preťažovaniu alternátora. Podľa otáčok sa teda upraví žiadaný výkon elektrolyzéra.

Samotné riadenie elektrolyzéra prebieha v podstate spínaním tranzistora vo výkonovej elektronike. Ten sa spína na základe riadiaceho signálu vo forme pulzov s meniacou sa šírkou pulzu (PWM). Ideálne by teda bolo, keby z regulačnej sústavy vychádzal PWM signál, ktorý by priamo spínal tranzistor.



Obr. 7.10 Schéma riadiacej a výkonovej elektroniky

Na predchádzajúcom obrázku nájdeme schému zapojenia riadenia so samotnou výkonovou elektronikou. Pri tomto spôsobe je najdôležitejšia rozhodovacia logika, ktorá za pomoci vopred určených pravidiel rozhodne o výkone elektrolyzéra. Najdôležitejšími hodnotami sú pri rozhodovaní palivo a vzduch. Zjednodušene sa dá povedať, že čím viac paliva ide do motora, tým aj viac zmesi HHO treba dodať. Pomer HHO a paliva sa môže s časom meniť. Hodnota závisí od potrieb motora, je teda potrebné v prvom rade zmapovať potreby konkrétneho motora a podľa nich nastaviť samotnú rozhodovaciu logiku. Otáčky motora sú dôležité hlavne u menej výkonných motoroch. Nastavenie šírky PWM signálu má na starosti PWM generátor, ktorý z požadovaného výkonu určí príslušnú šírku signálu. Je teda stanovený minimálny a maximálny výkon. Minimálnemu výkonu zodpovedá šírka pulzu 0% a maximálnemu šírka pulzu 100%.

8 Spôsob napájania elektrolyzéra

Dôležitou časťou celého HHO generátora je spôsob jeho napájania. Samotná výroba totiž nemôže prebiehať bez dodania energie zvonka. Množstvo energie závisí od výkonnosti a parametroch daného generátora. V našom prípade ide o napájanie napätím $U=14$ V a prúdom, ktorý dosahuje maximálnych hodnôt až $I=70$ A. Tieto hodnoty nie sú práve v automobile zanedbateľné.

8.1 Alternátor

Primárnym zdrojom elektrickej energie v automobile je alternátor. Alternátor má v automobile za úlohu zásobovať všetky elektrické súčiastky dostatočným množstvom energie a dobíjať autobatériu, ktorá slúži v podstate len vtedy, keď nie je alternátor v činnosti. Jedná sa teda hlavne o štart motora. Alternátor je v podstate točivý elektrický stroj, zapojený v generátorickom režime. Jeho výstupom je striedavý prúd. Využíva sa hlavne trojfázový alternátor, ktorého výstup je usmerňovaný na pulzný jednosmerný prúd. Alternátory sa vyrábajú v rôznych výkonoch. Záleží od konkrétneho typu automobilu, aký výkonný alternátor potrebuje.

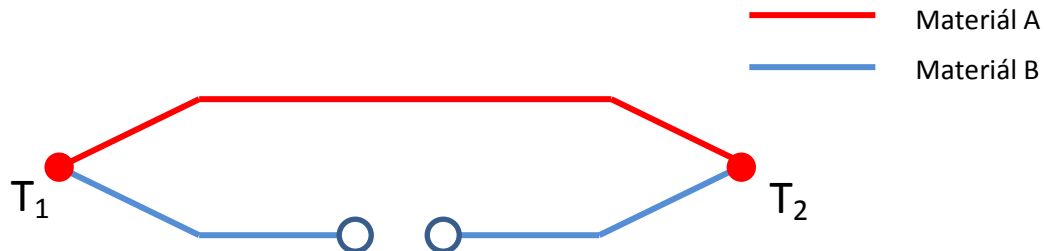
Keďže uvažujeme o napájaní elektrolyzéra pomocou automobilového alternátora, musíme počítať s tým, že elektrolyzér v plnom výkone bude mať veľký prúdový odber. Teda treba uvážiť či nie je vhodné alternátor vymeniť za výkonnejší tak, aby bol schopný zásobovať elektrickou energiou automobil i elektrolyzér v jeho plnom výkone.

Alternátor je poháňaný spaľovacím motorom a odoberá z neho výkon. Teda pri použití výkonnejšieho alternátora nám odoberie aj väčší výkon z motora. Pri použití alternátora ako zdroj pre elektrolyzér je teda vhodné vyberať alternátor s čo najväčšou účinnosťou, aby bol motor zaťažovaný čo najmenej. I pri vhodne zvolenom alternátore je lepšie pouvažovať nad iným zdrojom elektrickej energie pre elektrolyzér. Ako dobrý zdroj energie je návrh využiť odpadové teplo, ktoré vzniká v spaľovacom motore. Na získanie takejto energie sa využívajú články pracujúce na základe Seebeckovho javu. Pomocou nich sa dá vyrobiť elektrická energia z tepla a tú použiť na napájanie elektrolyzéra.

8.2 Seebeckov jav

Seebeckov jav alebo inak termoelektrický jav, je jav, pri ktorom dochádza k premene tepelnej energie na energiu elektrickú. Pričom ho môžeme pozorovať na dvoch vodičoch rôznych materiálov, na ich spojoch je teplotný rozdiel. Jeden koniec článku je

studenší a druhý je teplejší. V danom článku, alebo obvode vznikne napätie, takzvané termoelektrické napätie a začne ním pretekať prúd.



Obr. 8.1 Termočlánok

Materiály použiteľné na vodiče v termočlánku môžu byť rôzne, využívajú sa kovy ale aj polovodiče. Termočlánok má rôzne využitie, najčastejšie sa využíva na meranie teploty. Teda jeden koniec termočlánku sa zahrieva, pričom druhý má konštantnú nám známu teplotu a z generovaného napätia môžeme vyrátať teplotu na druhom konci termočlánku. V praxi nájdeme termočlánok zapojené aj opačne, respektíve tak, že je pripojený na zdroj napätia a vodičmi preteká elektrický prúd, pričom na jednom spoji termočlánku vzniká menšia teplota ako na druhom. Jeden koniec teda chladí a druhý hreje. Tento jav sa nazýva Peltierov jav. [15]

My však v našej aplikácii nepotrebujeme chladit', zohrievať ba ani merať teplotu. Pre nás je podstatné, že pomocou termočlánku sa dá vyrobiť elektrická energia. Keďže ako bolo spomínané, zdroj tepla v automobile existuje, je ním odpadné teplo produkované pri spaľovaní, dá sa využívať na zohrievanie teplého konca termočlánku. Otázne však je koľko energie z tepla dokážeme využiť. Termočláanky sú málo účinné. Ich účinnosť nepresahuje 8%. Keď si však zoberieme účinnosť spaľovacieho motora, ktorá sa pohybuje okolo 20% až 40% a straty ktoré sú odvedené pri chladení, ostáva nám zhruba 30% až 45% tepla, ktoré je odvádzané výfukovými plynmi. Samozrejme veľkosť energie, ktorá je odvedená výfukom, závisí na výkonnosti motora. Avšak pri veľkých autách, alebo tahačoch je sú bežné výkony motora nad 300 kW. Keby bol tento motor veľmi kvalitný a efektívny a unikalo by cez výfuk čo najmenej energie aj pri bežných termočláankoch, ktoré zďaleka nedosahujú účinnosť osem percent, by sme mali premeniť späť na elektrickú energiu zhruba 5 kW. Tieto hodnoty sú pre potreby napájania vodíkového generátora dostačujúce a výhodou je, že táto energia je získaná z odpadového tepla, ktoré sa v automobile nevyužíva a spôsobuje nám len zbytočné ohrievanie.

Vzťah pre výpočet elektromotorického napätia vzniknutého na termočlánku:

$$U = (a_A - a_B) \cdot (T_2 - T_1) + 0,5 \cdot (b_A - b_B) \cdot (T_2 - T_1)^2$$

kde

- a, b – sú Seebeckové koeficienty, ktoré sú závislé na materiálových vlastnostiach a dajú sa vyhľadať v tabuľkách
- $T_2 - T_1$ – je rozdiel teplôt medzi koncami termočlánku

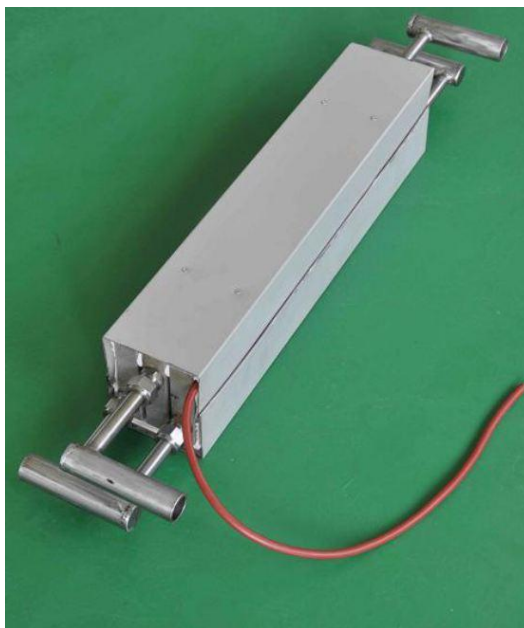
Po dosadení do vzorca zistíme, že napríklad pre termočlánok zložený z dvoch kovov, zo železa a medi, pri rozdieli teplôt 100°C dostávame napätie na termočlánku približne 1,21 milivoltu. [17] Čo nie je veľká hodnota na jeden článok. Preto sa články spájajú do skupín vytvárajúcich takzvané TEG (Thermoelectric Generator), termoelektrické generátory.

Termoelektrické generátory majú niekoľko výhod. Medzi ich hlavné výhody patrí malá údržba, nemajú žiadne pohyblivé časti, tichý chod a dokážu produkovať elektrickú energiu už pri malom tepelnom gradiente. Záleží na konštrukcii daného generátora, koľko energie je schopný vyvinúť. Dôležité je, aby bol schopný pokryť potreby nášho vodíkového generátora. Keďže samotná konštrukcia termoelektrického generátora nie je jednoduchá záležitosť, je vhodné siahnuť už po navrhnutých generátoroch, ktoré sú v predaji. Je viacero firiem, ktoré sa zaoberajú vývojom TEG na rôzne použitie. Medzi ich produktmi môžeme nájsť aj zariadenia priamo pre automobil. Jedná sa o zariadenie, ktoré sa montuje priamo do výfukového potrubia. Veľkou výhodou je to, že sa netreba zaoberať návrhom TEG. Avšak aj pri výbere generátora, ktorý bude dodávať dostatočné množstvo energie, treba myslieť na to, že maximálna energia, ktorú je schopný vyvinúť, je pri určitom teplotnom rozdieli. Teda hneď po naštartovaní motora, kedy bude výfukové potrubie ešte chladné, nebude termoelektrický generátor schopný dodávať energiu pre HHO generátor. Tento problém sa dá vyriešiť viacerými spôsobmi:

- Zapnúť HHO generátor až v dobe, keď bude termoelektrický generátor schopný dodávať dostatočné množstvo energie. Tento spôsob je vhodný najmä na dlhé jazdy. Pri krátkych jazdách sa potrubie nezohreje dostatočne a teda HHO generátor nebude mať napájanie.
- Využívať energiu z alternátora na dobu, kedy bude termoelektrický generátor mimo prevádzky. Je to v podstate kompromis, keďže nám ide o to aby, sme motor automobilu viac nezaťažovali, využijeme ho len na dobu potrebnú na zohriatie výfukového potrubia.
- Využiť výkonnejší termoelektrický generátor a samostatnú batériu. Výkonnejší TEG bude schopný v plnom výkone napájať HHO generátor a zároveň dobíjať batériu. Energia uložená v batérii by slúžila na zásobenie HHO generátora energiou počas nečinnosti TEG.

Využitím TEG sa síce cena celého vodíkového generátora predraží, ale vo výsledku bude samostatný. I keby sa nepodarilo navrhnuť, alebo nájsť TEG s potrebnými parametrami, stále je tu možnosť využiť menej výkonný TEG a použiť ho v kombinácii s alternátorom. Pri tomto spôsobe by nebol natoľko zaťažovaný alterator. Takýto generátor vyrába napríklad firma TEG Power. Jedná sa o aplikáciu určenú priamo pre automobily poskytujúcu maximálny výkon 350 W. Taktiež môžeme nájsť rôzne iné firmy, ktoré

vyrábajú generátory o výkonoch do 600 W. Takto by sa získala až polovica energie potrebnej na plný výkon elektrolyzéra.



Obr. 8.2 Obrázok TEG od firmy TEG Power (prevzaté z [8])

9 Realizácia

Pri realizácii nastáva otázka, či sa vývoj HHO generátora oplatí z hľadiska investícií. Treba si uvedomiť, že celý projekt sa zameriava hlavne na znižovanie emisií, a nie na šetrenie paliva. Úspora paliva je v tomto prípade braná ako vedľajšia. Ako modelový príklad si môžeme uviesť, že by bolo výsledné zníženie emisií o 12 až 15%. Teda aj samotná spotreba by klesla o spomínanú hodnotu. Bežne sa pohybuje spotreba nákladných áut nad 30 l/100 km. Predpokladaná cena HHO generátora je 15 000 EUR aj s montážou do automobilu.

Počiatočné náklady	15 000 EUR
Spotreba	35 l/100 km
Cena paliva	1,5 EUR/l
Ročná prevádzka	200 000 km
Ročné náklady na palivo	105 000 EUR
Náklady KOH a destilovaná voda	200 EUR na 50 000 km
Šetrenie paliva s HHO	12 %
Ročné náklady s HHO	93 200 EUR
Ročné šetrenie	11 800 EUR

Z predchádzajúcich údajov je vidieť, že návratnosť nákladov závisí od konkrétnej spotreby automobilu a od ročnej prevádzky, teda koľko kilometrov najazdí ročne. Dá sa však predpokladať, že náklady by boli návratné za dva až tri roky. Dôležité je však, že po znížení emisií budú môcť tieto automobily aj naďalej jazdiť a firma tak nebude musieť vynaložiť peniaze na kúpu nových automobilov, ktoré emisné limity spĺňajú.

V čase písania tejto práce je celé zariadenie vo fáze testovania. Bol postavený prototyp HHO generátora, ktorý sa testuje na ťahačoch v Španielsku a v USA. Generátor bol postavený na základe návrhu uvedeného v tejto diplomovej práci v spolupráci s firmou Hydro Phi. Veľkosť elektrolyzéra som navrhol podľa určených požiadaviek firmou pre testované vozidlo s ohľadom na účinnosť zistenú pri meraniach na prvom prototypu v laboratóriu firmy na Slovensku. Testovanie na vozidle nie je technicky jednoduché, treba mať k dispozícii vhodné vozidlo – kamión a testuje sa za prevádzky vozidla. Mne nebolo umožnené testovanie na vozidle, a preto sú merania, ktoré som vykonával v tejto práci len na testovacom zariadení v laboratórií, postaveného na základe môjho návrhu a zo súčiastok od firmy Hydro Phi.

Samotné testovanie je problematické, musí byť vykonávané za jazdy vozidla, teda za reálnych pracovných podmienok. Testovacie zariadenie je momentálne bez riadenia. Teda produkcia zmesi HHO je po celý čas konštantná. Po testovaní, ktoré môže trvať rok až dva sa bude celý systém zdokonaľovať a navrhovať riadenie podľa nameraných údajov za prevádzky vozidla.

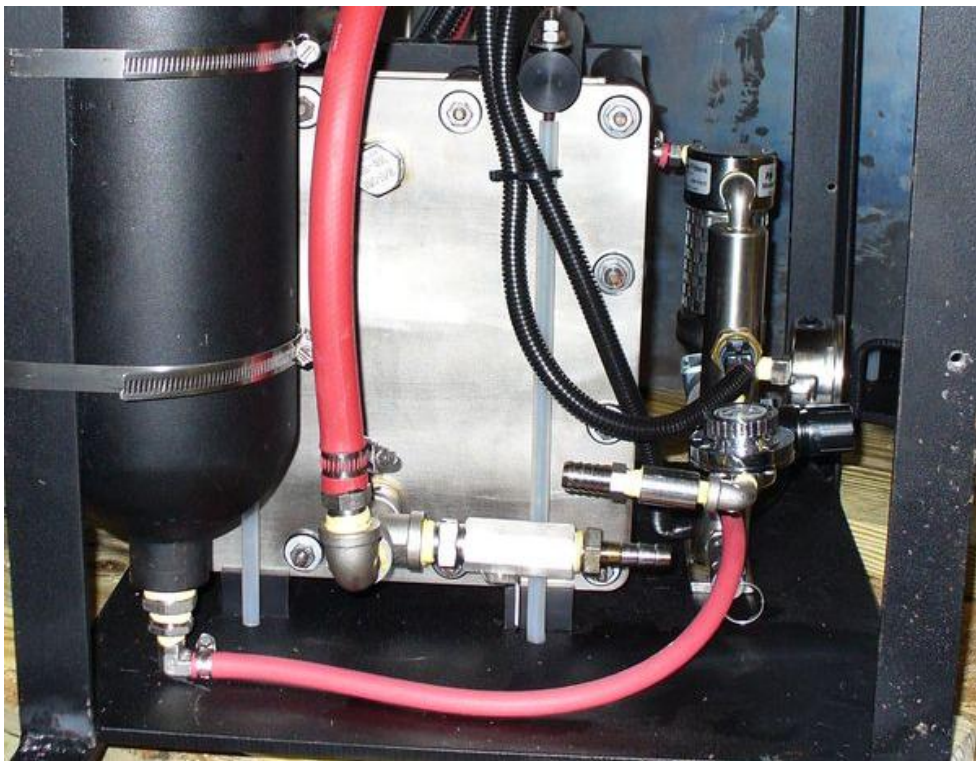
Ďalšia záležitosť, ktorú bude treba riešiť je homologizácia zariadenia. V prípade testovania a teda prototypu homologizácia nie je potrebná. Jednotka bude musieť byť zvlášť homologizovaná na každý typ ťahača, do ktorého sa bude montovať. Montovať zariadenie do automobilu budú môcť len odborníci v určených servisoch alebo dielňach. Inak by sa jednalo o nedovolený zásah alebo úpravu do automobilu.



Obr. 9.1 Montážny priestor pre zabudovanie HHO generátora v ťahači



Obr. 9.2 Vstup HHO do nasávania vzduchu motora



Obr. 9.3 Pohľad do testovacieho HHO generátora

Záver

Pri návrhu HHO generátora bol vytvorený vyvíjač vodíka na základe elektrolýzy vody. Celý proces bol popísaný Faradayovými zákonmi elektrolýzy. Pomocou nich bol navrhnutý spôsob výpočtu rozmerov samotného elektrolýzera, kde vstupným kritériom bol požadovaný výkon elektrolýzera.

V práci boli popísané rôzne spôsoby konštrukcie elektrolýzerov a ich možnosti použitia v tejto aplikácii. Taktiež bol spracovaný výber vhodného elektrolytu pre dané použitie. Pri rozhodovaní bol hlavným ukazovateľom spôsob ich reakcie pri elektrolýze. Vybraný bol elektrolyt, ktorý pri reakcii nevytváral vedľajšie produkty.

Keďže celý systém je určený pre automobily, bol v práci navrhnutý senzorický systém, ktorý získava potrebné údaje pre riadenie výkonu elektrolýzera. Následne boli popísané rôzne spôsoby riadenia produkcie elektrolýzera a vybraný spôsob, ktorý by bol na realizáciu zložitejší a vyžadoval by ďalšiu analýzu a ladenie na konkrétnej reálnej sústave. Avšak vybraný spôsob riadenia by bol z energetického hľadiska a s ohľadom na optimálne množstvo zmesi vodíka a kyslíka najvhodnejší.

Záverom práce je navrhnutý systém napájania generátora. Pričom je snaha o čo najväčšiu energetickú samostatnosť celého systému. Vzhľadom na to bol vybraný spôsob získavania energie z odpadového tepla vzniknutého pri spaľovaní zmesi v motore automobilu. Napájanie využíva termoelektrické články, ktoré zásobujú batériu vodíkového generátora a zároveň slúžia na jeho chod.

Bolo by dobré podotknúť, že pri ďalšej práci na vodíkovom generátore by bolo vhodné zvážiť možnosť výroby zmesi HHO tak, aby nedochádzalo k zmiešaniu týchto dvoch plynov hneď pri ich výrobe. Systém treba vylepšiť tak, aby bol každý z plynov vedený k motoru zvlášť a k ich zmiešaniu by dochádzalo až v motore automobilu. Výrazne by sa tak zvýšila bezpečnosť celého systému. Taktiež čo sa týka zabudovania navrhovaného systému, je vhodné zvoliť miesto tak, aby pri prípadnom úniku plynov nedochádzalo k ich hromadeniu, ale aby unikali do voľného priestranstva. V prípade, že takéto zabudovanie nie je možné, treba zvážiť nútenú ventiláciu celého priestoru. Výhodné by bolo navrhnuť spôsob monitorovania úniku plynu a následne pri jeho úniku celý systém výroby zastaviť.

Samotný vyvíjač vodíka a kyslíka je možné riešiť aj ako PEMcell, kde nie je potrebný elektrolyt, ale vodík a kyslík sa získavajú priamo z destilovanej vody. Nevznikajú tak nebezpečenstvá, ktoré sú spojené s manipuláciou s KOH.

Literatura a odkazy

- [1] SANTILLI R. M., ARINGAZIN A. K.: *Structure and Combustion of Magne gases*, Hadronic Journal (27), pp. 299-330, 2001
- [2] SANTILLI R.M.: *A new gaseous and combustible form of water*, International Journal of Hydrogen Energy 31 (9), pp. 1113-1128, 2006
- [3] HHO ORGANIZATION, *Výpočty produkcie a výkonu HHO generátora*, Dostupné z: <<http://hho.sk>>
- [4] TRANSCOM, *Prietokomery – priemyselné prietokomery*, Dostupné z: <<http://www.transcoma.sk>>
- [5] MERATEX, *Snímače teploty*, Dostupné z: <<http://www.meratex.sk/meracie-pristroje/snimace-teploty/>>
- [6] KRČEK, M. *Analýza využití vodíku v energetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Radil.
- [7] KÜRTHY, M. *Palivový článok jako alternativní zdroj el. energie*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2009. 48 s
- [8] TEG POWER, *Thermoelectric generators*, Dostupné z: <<http://www.tegpower.com/>>
- [9] <<http://hho4free.com/electrolytes.htm>> internetový zdroj
- [10] THE PERIODIC TABLE, <<http://chemicool.com/>> internetový zdroj
- [11] ENCYCLOPEDIA BRITANNICA ONLINE, S. V. *Thermoelectric power generator*, accessed May 20, 2012
- [12] ROUŠAR, I., MICKA, K., KIMLA, A.: *Elektrochemie*, Academia Praha 1982 –2.doplující vydání, Tem. skup. 03/6 21-048-81
- [13] DUŠEK, B. *Chemie pro gymnázia I*. SPN - pedagogické nakladatelství, a.s. 2007, 80-7235-369-1
- [14] HEŘMANSKÝ, B., ŠTOLL, I.: *Energie pro 21. století*, ČVUT '92. Citované z <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrolýza/>>
- [15] Thermocouple, [12-04-20]. Dostupné z <<http://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple/>>
- [16] ČIČMANEC, P., *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetizmus*, Bratislava: Alfa a SNTL, 1980.